Untersuchungen zum Strömungsverhalten in einer Spiralstrahlmühle mittels Druckmessungen

Dissertation zur Erlangung
des naturwissenschaftlichen Doktorgrades
der Bayerischen Julius-Maximilians-Universität Würzburg

vorgelegt von
Annika Hagendorf
aus Moers

Würzburg 2006

Eingereicht am: .....
bei der Fakultät für Chemie und Pharmazie

1. Gutachter: .....
2. Gutachter: .....
der Dissertation

1. Prüfer: .....
2. Prüfer: .....
3. Prüfer: .....
des Öffentlichen Promotionskolloquiums

Tag des Öffentlichen Promotionskolloquiums: .....

Doktorurkunde ausgehändigt am: .....

Meinen Eltern und meiner Großmutter

"Ich überlegte mir vielerlei.
Endlich beschloss ich, die Sache durch Experimente aufzuklären.“

Johann Jakob Wepfer (1620 - 1695)

Die vorliegende Arbeit entstand auf Anregung von Herrn Prof. Dr. Ingfried Zimmermann am Lehrstuhl für Pharmazeutische Technologie des Instituts für Pharmazie und Lebensmittelchemie der Bayerischen Julius-Maximilians-Universität Würzburg.

Ich danke allen, die mich während meiner Promotionszeit durch ihre tatkräftige Hilfe und wertvollen Ratschläge unterstützt haben.

Besonderer Dank gilt vor allem

- Professor Ingfried Zimmermann, meinem Doktorvater, für die Auswahl des Themas sowie hilfreiche Gespräche mit vielfachen Anregungen und konstruktiven Hinweisen. Hervorheben möchte ich besonders die Förderung einer selbständigen wissenschaftlichen Arbeit, für die auf Grund der Arbeitsbedingungen gute Voraussetzungen gegeben waren.

- Andreas Scholz und Markus Diener, Firma WIKA, Klingenberg, die mir den Druckaufnehmer D 10 sowie die zugehörige Software freundlicherweise zur Verfügung gestellt haben.

- Georg Walter und seinen Mitarbeitern in der institutseigenen Werkstatt für die Anfertigung der Pitot-Rohre sowie ihre kompetente Beratung und Unterstützung bei zahlreichen Problemen.

- Dr. Bernd Reyer, Lehrstuhl für Pharmazeutische Chemie, für die Unterstützung bei allen Schwierigkeiten, die während der Anfertigung dieser Arbeit mit dem Computer auftraten.

- Markus Meier, Zentrum für Angewandte Energieforschung der Universität Würzburg, für die graphische Erstellung der Strömungsprofile mittels MATLAB®.

- meinen Kollegen am Lehrstuhl für Pharmazeutische Technologie für gute Zusammenarbeit und zahlreiche Diskussionen.

- meiner Familie, meinen Freunden und ganz besonders Sven für ihr Verständnis sowie Motivation und Unterstützung im privaten Bereich, die mir damit das Anfertigen dieser Dissertation sehr erleichterten.

Ein Teil der Ergebnisse, die aus dieser Arbeit hervorgingen, wurde bereits veröffentlicht:

Hagendorf, A., Zimmermann, I.: Pressure measurements in a jet mill, 5th Worldmeeting on Pharmaceutics, Biopharmaceutics and Pharmaceutical Technology, März 2006, Genf, Schweiz

1 Einleitung ... 1
2 Theoretische Grundlagen ... 3
2.1 Aufbau der Spiralstrahlmühle ... 3
2.2 Zerkleinerungsvorgänge in der Spiralstrahlmühle ... 4
2.2.1 Prallbeanspruchung ... 4
2.2.2 Bruchverhalten ... 7
2.2.3 Zerkleinerungs- und Sichtungsvorgänge ... 8
2.3 Strömungsvorgänge in der Spiralstrahlmühle ... 11
2.3.1 Treibstrahlverlauf ... 11
2.3.2 Untersuchungen mit tribolumineszierenden Substanzen ... 12
2.3.3 “Drei-Ebenen-Modell“ ... 14
2.4 Theoretische Betrachtung der Strömung in der Spiralstrahlmühle ... 16
2.4.1 Bernoulli-Gleichung ... 16
2.4.2 Statischer Druckverlauf ... 16
2.4.3 Messung des Gesamtdrucks mittels Pitot-Rohr ... 19
2.4.3.1 Eigenschaften der Strömung in der Spiralstrahlmühle ... 20
2.4.3.2 “Kompressible Bernoulli-Gleichung“ ... 25
3 Arbeitshypothese ... 27
4 Material und Methode ... 29
4.1 Material ... 29
4.2 Methode ... 30
4.2.1 Spiralstrahlmühle Fryma JMRS 80 ... 30
4.2.1.1 Mahlkammer mit Düsen ... 31
4.2.1.2 Injektor und Dosiereinheit ... 32
4.2.1.3 Tauchrohr und Auffangeinheit ... 33
4.2.1.4 Druckaufnehmer für den statischen Druck ... 34
4.2.1.5 Zusätzliche Ausstattung der Spiralstrahlmühle ... 36
4.2.1.5.1 Mahlkammerdeckel ... 37
4.2.1.5.2 Pitot-Rohr ... 37
4.2.1.5.3 Druckaufnehmer für den Gesamtdruck ... 41
4.2.2 Versuchsplanung und Durchführung ... 44
4.2.2.1 Messung des statischen Drucks ... 45
4.2.2.2 Messung des Gesamtdrucks ... 47

4.2.3 Auswertung der aufgenommenen Druckwerte und Berechnung der Strömungsgeschwindigkeit ... 49
4.2.4 Fehlerbetrachtung ... 50
4.2.5 Partikelgrößenanalyse ... 50
4.2.6 RRSB-Verteilung ... 52
5 Ergebnisse und Diskussion ... 53
5.1 Messungen des statischen Drucks ... 53
5.1.1 Vergleich der Druckaufnehmer ... 53
5.1.2 Statischer Druck in Abhängigkeit von der Position des Druckaufnehmers 55
5.1.3 Statischer Druck in Abhängigkeit vom Radius ... 56
5.1.4 Statischer Druck in Abhängigkeit vom Mahldruck ... 58
5.1.5 Statischer Druck in Abhängigkeit von der Feststoffkonzentration ... 59
5.1.6 Statischer Druck in Abhängigkeit von der Position des Druckaufnehmers bei Feststoffbeladung ... 61
5.1.7 Statischer Druck in Abhängigkeit vom Mahldruck bei Feststoffbeladung . 63
5.2 Konstruktion eines geeigneten Pitot-Rohres ... 67
5.3 Messungen des Gesamtdrucks und resultierende Strömungsgeschwindigkeiten ... 69
5.3.1 Gesamtdruck und Strömungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Anströmwinkel des Pitot-Rohres ... 69
5.3.2 Gesamtdruck und Strömungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Eintauchtiefe des Pitot-Rohres ... 70
5.3.3 Gesamtdruck und Strömungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Position des Pitot-Rohres ... 71
5.3.4 Auswertung der gemessenen Druck- und Temperaturwerte ... 73
5.3.5 Strömungsprofile ... 78
5.3.5.1 Strömungsverlauf in den Treibstrahlebenen (+1) und (-1) ... 79
5.3.5.2 Strömungsverlauf in den Ebenen 2, 3 und 4 ... 82
5.3.5.2.1 Strömungsverlauf in den Ebenen (+2), (+3) und (+4) oberhalb der Treibstrahlen ... 82
5.3.5.2.2 Strömungsverlauf in den Ebenen (-2), (-3) und (-4) unterhalb der Treibstrahlen ... 86
5.3.5.3 Strömungsverlauf in den Ebenen 5, 6, 7 und 8 ... 90
5.3.5.3.1 Strömungsverlauf in den oberen Ebenen (+5) und (+6) der Mahlkammer 90

5.3.5.3.2 Strömungsverlauf in den Ebenen (-5), (-6), (-7) und (-8) über der Bodenfläche der Mahlkammer ... 93
5.3.5.4 Strömungsverlauf unterhalb des Mahlkammerdeckels ... 98
5.3.5.5 Gesamtdruck und Strömungsgeschwindigkeit auf dem Radius 26,5 mm 100
5.3.5.6 Beurteilung der Strömungsverläufe in der Spiralstrahlmühle ... 103
5.3.5.7 Bestimmung der Treibstrahllänge ... 106
5.3.6 Gesamtdruck und Strömungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Mahldruck ... 108
5.3.7 Fehlerbetrachtung ... 112
5.3.8 Gesamtdruck in Abhängigkeit von der Feststoffbeladung ... 115
6 Zusammenfassung ... 118
7 Summary ... 123
8 Literaturverzeichnis ... 127
9 Anhang ... 132
9.1 Konstruktionszeichnungen der Spiralstrahlmühle JMRS 80 ... 132
9.1.1 Mahlkammerdeckel mit Messbohrungen auf den Radien 35,5; 26,5; 17,0; 13,0; 11,0; 9,0; 0,0 mm ... 132
9.1.2 Mahlkammerdeckel mit Messbohrung auf dem Radius 4,0 mm ... 133
9.2 Programm zur Ansteuerung des Druckaufnehmers für den statischen Druck und des Freiblasventils ... 134
9.3 Konstruktionszeichnung des Druckaufnehmers für den statischen Druck XT 190 M ... 136
9.4 Einstellung der Förderraten ... 136
9.5 Konstruktionszeichnungen des Pitot-Rohres, Distanzrohres und Mahlkammerdeckels ... 137
9.5.1 Pitot-Rohr - Ansicht I und II ... 137
9.5.2 Distanzrohr ... 139
9.5.3 Eingebautes Pitot-Rohr in den Mahlkammerdeckel ... 140
9.6 Konstruktionszeichnung des Gesamtdruckaufnehmers D 10 ... 141
9.7 Programm zur graphischen Darstellung der Strömungsprofile ... 142
9.8 Rohdaten der Messungen des Gesamtdrucks ... 144
9.8.1 Radius 0,0 mm ... 144
9.8.2 Radius 4,0 mm ... 145
9.8.3 Radius 9,0 mm ... 150

9.8.4 Radius 11,0 mm 156
9.8.5 Radius 13,0 mm 162
9.8.6 Radius 17,0 mm 164
9.8.7 Radius 26,5 mm 177
9.8.8 Radius 35,5 mm 190
9.9 Rohdaten zur Berechnung der Strömungsgeschwindigkeiten in den einzelnen Ebenen der Spiralstrahlmühle 199
9.9.1 Stirnfläche der Mahlkammer 199
9.9.2 Ebene (+6) 201
9.9.3 Ebene (+5) 202
9.9.4 Ebene (+4) 203
9.9.5 Ebene (+3) 204
9.9.1 Ebene (+2) 205
9.9.2 Ebene (+1) 206
9.9.3 Ebene (-1) 207
9.9.4 Ebene (-2) 208
9.9.5 Ebene (-3) 209
9.9.6 Ebene (-4) 210
9.9.7 Ebene (-5) 211
9.9.8 Ebene (-6) 211
9.9.9 Ebene (-7) 212
9.9.10 Ebene (-8) 213

a	Schallgeschwindigkeit [m/s]
A	Düsenquerschnittsfläche [m^2]
c_p	spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck [$m^2/(s^2\,K)$]
c_v	spezifische Wärmekapazität bei konstantem Volumen [$m^2/(s^2\,K)$]
d	Partikeldurchmesser [m]
d_g	Grenzkorndurchmesser [m]
d'	Lageparameter [m]
d	Innendurchmesser [m]
D	Außendurchmesser [m]
D	Durchgangssumme [m]
Δv_{max}	maximaler Fehler der Geschwindigkeit [m/s]
ΔT	Messungenauigkeit des Temperaturaufnehmers [K]
E_{kin}	kinetische Energie [kg m^2/s^2]
E_{pot}	potentielle Energie [kg m^2/s^2]
$\dot{m}_S$	Feststoffmassenstrom [kg/s]
$\dot{m}_L$	Luftmassenstrom [kg/s]
$\dot{m}_{th}$	theoretischer Gasmassenstrom [kg/s]
Ma	Machzahl [-]
n	Gleichmäßigkeitszahl [-]
p	Druck [Pa]
p^*	kritischer Druck [Pa]
p_{ges}	Gesamtdruck [Pa]
p_{stat}	statischer Druck [Pa]
p_{dyn}	dynamischer Druck [Pa]
Q	Wärme [kg m^2/s^2]
R_L	spezifische Gaskonstante Luft [287,22 J/(kg K)]
R	Wölbungsradius [m]
R^2	Korrelationskoeffizient [-]
r	Radius [m]
r_i	Tauchrohrradius [m]
s_0	maximaler Flugweg [m]
T	Temperatur [K]
u	Umfangsgeschwindigkeit [m/s]

v	Geschwindigkeit [m/s]
v_{ri}	Radialgeschwindigkeit [m/s]
v_{max}	maximale Geschwindigkeit [m/s]
$\overline{v}_{max}$	Mittelwert der maximalen Geschwindigkeit [m/s]
W	Arbeit [kg m^2/s^2]
x_{50}	Median [m]

α	Düsenanstellwinkel [°]
δ	Anströmwinkel des Pitot-Rohres [°]
Δp	Änderung der Dichte [kg/m^3]
$\frac{\partial v}{\partial T}$	partielles Differential der Geschwindigkeit nach der Temperatur [m/(s K)]
ε	Hohlraumvolumenanteil [-]
η_L	Viskosität der Luft [Pa s]
κ	Isentropenkoeffizient [-]
$\overline{\lambda}$	mittlere freie Weglänge [m]
μ	Feststoffbeladung [-]
ψ	Ausflussfunktion [-]
ρ_L	Luftdichte [kg/m^3]
ρ_S	Feststoffdichte [kg/m^3]

1 Einleitung

Das Zerkleinern von Wirk- und Hilfsstoffen auf eine bestimmte Partikelgröße ist ein wichtiger verfahrenstechnischer Schritt bei der Herstellung und Entwicklung von Arzneimitteln. Durch Zerkleinern können physikalische Eigenschaften von Feststoffen, wie z. B. die Benetzbarkeit, die Mischbarkeit sowie das Löse- und Schüttverhalten, günstig beeinflusst werden [59].

Eine geeignete Methode zur effektiven Zerkleinerung von Pulverpartikeln ist die Verwendung von Spiralstrahlmühlen. Die Reduktion der Korngröße erfolgt dabei durch gegenseitigen Stoß der Teilchen. Die Partikel erfahren durch die vorherrschenden hohen Geschwindigkeiten eine derartige Beschleunigung, dass durch den gegenseitigen Aufprall eine Feinstzerkleinerung bis auf wenige Mikrometer erfolgt [22, 67]. Trotz eines hohen Energiebedarfs hinsichtlich Strom und Druckluft erweist sich der Einsatz von Spiralstrahlmühlen als vorteilhaft, da keine nennenswerte Erwärmung des Mahlgutes in der Mühle erfolgt [28, 55]. Zudem sind zusätzliche Mahlwerkzeuge, wie z. B. in Kugel- oder Stiftmühlen nicht notwendig [31].

In den USA begann bereits in den 30er Jahren die Entwicklung verschiedener Strahlmühlen, die auch heute noch Anwendung in der chemischen Industrie finden.

In den 60er Jahren beschäftigten sich Rumpf und Mitarbeiter [37] damit, die Vorgänge in der Spiralstrahlmühle während des Mahlprozesses zu beobachten und modellhaft zu beschreiben. Mit Hilfe dieser Untersuchungen ließen sich erste grundlegende Erkenntnisse zum Verständnis der Partikelzerkleinerung gewinnen. Eine vollständige Erklärung der physikalischen Vorgänge während der Zerkleinerung konnte jedoch bisher nicht gegeben werden.

2001 instrumentierte Rief [66] eine Spiralstrahlmühle vom Typ Fryma JMRS 80 mit einem statischen Drucksensor, um Druckverläufe in der Mahlkammer während des Zerkleinerungsprozesses zu erfassen. Dabei wurde der statische Druck in Abhängigkeit von relevanten Parametern, wie z. B. verändertem Mahldruck, Tauchrohrposition sowie Feststoffkonzentration untersucht. Die erhaltenen Druckkennlinien dienten zur Inprozess-Kontrolle während einer Mahlung. Auf diese Weise ließen sich stabile Druckverläufe von instabilen Zuständen mit hoher Genauigkeit abgrenzen.

1732 stellte Henri de Pitot [48] erstmals die von ihm entwickelte Staudrucksonde zur Messung der Geschwindigkeit von Fluiden vor. Diese einfache Messtechnik findet noch heute sowohl im Bereich der Luftfahrt an der Außenseite von Flugzeugen als auch zur

Windgeschwindigkeitsmessung in der Meteorologie vielseitige Anwendung [29]. Im Bereich der Strömungsmechanik ist diese Methode zur Bestimmung von Geschwindigkeiten ebenfalls nicht mehr wegzudenken. Mittels Pitot-Rohr wird der Gesamtdruck aufgenommen und bei Kenntnis des statischen Drucks in eine lokale Geschwindigkeit umgerechnet.

Die vorliegende Arbeit soll dazu beitragen, weitere Erkenntnisse über die Strömungsvorgänge in der Spiralstrahlmühle zu gewinnen. Es ist zu prüfen, ob sich mit Hilfe eines Pitot-Rohres korrekte Gesamtdruckwerte aufzeichnen lassen, um Strömungsgeschwindigkeiten und -richtungen in der Spiralstrahlmühle zu ermitteln. Dazu muss zunächst eine Messvorrichtung entwickelt werden, mit der Versuche durchführbar und reproduzierbare Ergebnisse erzielbar sind.

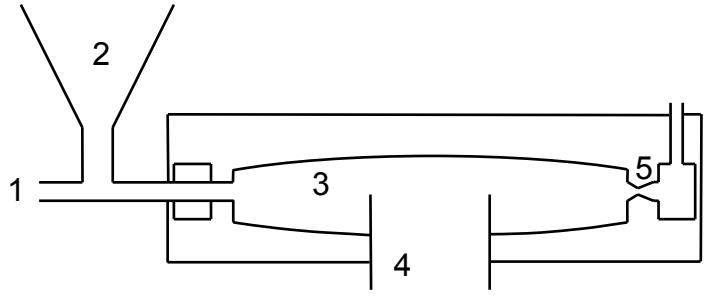
Bei intensivem Studium der Literatur fällt auf, dass die Darstellung der zu Forschungszwecken eingesetzten Strahlmühlen große Unterschiede und teilweise auch Ungenauigkeiten hinsichtlich ihrer Geometrie sowie apparativen Ausstattung aufweist. Daher dienen diese Werte nur zur Orientierung. Ferner zeigt sich, dass nur wenig experimentelle Daten über die Strömung der Spiralstrahlmühle ohne Feststoffbeladung vorliegen [4, 52]. Die Beladung der Strahlmühle mit Mahlgut erschwert die Untersuchung der Strömungsprozesse. Aus diesem Grund liegt der Schwerpunkt dieser Arbeit in der Untersuchung des Verhaltens der reinen Luftströmung mit dem Ziel, ein Strömungsprofil der Spiralstrahlmühle zu erstellen. Anschließend werden die Messungen durch Einsatz einer Modellsubstanz ausgeweitet. Diese Versuche sollen weitere Erkenntnisse über das Strömungsverhalten in der Spiralstrahlmühle bei Feststoffbeladung liefern.

2 Theoretische Grundlagen

In diesem Kapitel wird der derzeitige Stand der Forschung über die Partikelzerkleinerung in Spiralstrahlmühlen zusammengefasst. Dazu erfolgt zunächst eine nähere Betrachtung der Zerkleinerungs- und Strömungsvorgänge. Im Weiteren werden die physikalischen Grundlagen des für diese Arbeit relevanten Messprinzips erläutert und notwendige Formeln zur Berechnung von Strömungsgeschwindigkeiten vorgestellt. Zuerst erfolgt eine kurze Beschreibung des Aufbaus der Spiralstrahlmühle.

2.1 Aufbau der Spiralstrahlmühle

Die Spiralstrahlmühle besteht aus einer flach gewölbten Mahlkammer (3), an deren Umfang fünf Düsen (5) angeordnet sind. Durch ihren tangentialen Anstellwinkel wird ein spiraliger Verlauf der zirkulierenden Grundströmung im Uhrzeigersinn erzwungen. Mittels Injektor (1) und Dosiereinheit (2) erfolgt der Transport des zu zerkleinernden Pulvers in die Mahlkammer. Das Mahlgut wird von den aus den Düsen austretenden Treibstrahlen erfasst, in diesen beschleunigt und durch gegenseitige Teilchenstöße zerkleinert. Über ein Tauchrohr (4) wird das mikronisierte Pulver abgeschieden. Die nachfolgenden Abbildungen 2-1 und 2-2 veranschaulichen schematisch den Aufbau der eingesetzten Spiralstrahlmühle sowie der Mahlkammer. Der Verlauf der Treibstrahlen ist durch die gestrichelten Linien dargestellt. Eine detaillierte Beschreibung zur Funktionsweise der einzelnen Bauteile der Versuchsanlage erfolgt in Kapitel 4.2.1.



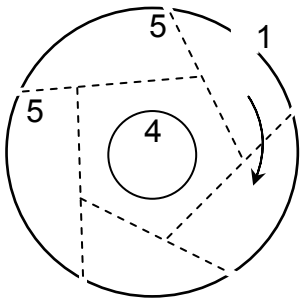


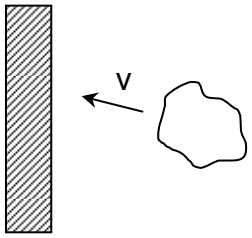
Abbildung 2-1 (links): Schnitt durch die Spiralstrahlmühle [66]
(1) Injektor (2) Dosiereinheit (3) Mahlkammer (4) Tauchrohr (5) Düse

Abbildung 2-2 (rechts): Aufsicht auf die Mahlkammer
(1) Injektor (4) Tauchrohr (5) Düsen

2.2 Zerkleinerungsvorgänge in der Spiralstrahlmühle

2.2.1 Prallbeanspruchung

In Zerkleinerungsmaschinen werden die Pulverpartikel verschiedenen Beanspruchungsarten unterworfen. Zwischen zwei Flächen erfolgt die Beanspruchung der Partikel nach der Beanspruchungsart I mittels Druck- oder Schubbelastung. Die hier auftretenden Geschwindigkeiten sind sehr gering. Nach Rumpf [68] ist allein die Beanspruchungsart II für die Zerkleinerung in der Spiralstrahlmühle von großer Bedeutung, die durch Prall der Partikel gegen eine Fläche erfolgt. Entsprechend den Abbildungen 2-3 und 2-4 kann dies durch Prall gegen die Wand oder durch gegenseitigen Prall stattfinden:



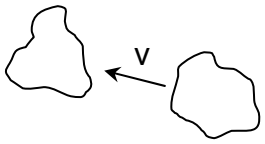


Abbildung 2-3 (links): Beanspruchung durch Prall gegen die Wand [68]
Abbildung 2-4 (rechts): Beanspruchung durch gegenseitigen Prall von zwei Partikeln

In Prallmühlen werden die Partikel durch Impulsaustausch mit den Treibstrahlen auf Geschwindigkeiten von 50 bis zu mehreren 100 m/s beschleunigt. Die gegenseitige Beanspruchung erfolgt dabei nicht nur zwischen im Treibstrahl beschleunigten Teilchen unterschiedlicher Geschwindigkeit, sondern auch mit radial in die Strömung eindringenden Partikeln [52]. Aufgrund der überwiegend hohen Prallgeschwindigkeiten genügen schon kurze Stoßzeiten für eine effektive Zerkleinerung [40]. Die Häufigkeit des Pralls wird dabei durch eine ausreichende Beladung der Mühle mit Feststoff sichergestellt. Die Prallbeanspruchung erfolgt gemäß den mechanischen Stoßgesetzen. Entsprechend der Theorie der Prallzerkleinerung [70] kann die Wahrscheinlichkeit für den gegenseitigen Stoß kugelförmiger Partikel mit gleicher Korngröße angegeben werden. Bei einer im Mittel gleichmäßig räumlichen Verteilung ist dabei eine Boltzmann-Maxwell´sche Geschwindigkeitsverteilung anzunehmen, sofern die Bewegungen der Teilchen keine Vorzugsrichtung besitzen. Ausgehend von dem Modell der kinetischen Gastheorie lässt sich die mittlere freie Weglänge $\bar{\lambda}$ zwischen zwei Partikeln nach Gleichung 2.1 näherungsweise abschätzen:

$$\bar{\lambda} \approx \frac{d}{6 \cdot (1-\varepsilon)\sqrt{2}} \tag{2.1}$$

$\bar{\lambda}$ mittlere freie Weglänge [m]
d Partikeldurchmesser [m]
ε Hohlraumvolumenanteil [-]

Es zeigt sich, dass die mittlere freie Weglänge umgekehrt proportional zur Feststoffkonzentration ist, also zu dem von den Teilchen eingenommenen Volumenanteil (1-ε). Bei hoher Konzentration ist $\bar{\lambda}$ klein, wodurch eine hohe Wahrscheinlichkeit für gegenseitigen Aufprall besteht. Als Folge verringert sich der Partikeldurchmesser, und die mittlere freie Weglänge $\bar{\lambda}$ nimmt ebenso ab.
Als Maß für die Beweglichkeit der Teilchen dient der maximale Flugweg s_0, der sich unter Berücksichtigung des Stokes´ schen Gesetzes nach Gleichung 2.2 angeben lässt:

$$s_0 = \frac{d^2 \cdot \rho_s \cdot v_0}{18 \cdot \eta_L} \tag{2.2}$$

s_0 maximaler Flugweg [m]
d Partikeldurchmesser [m]
ρ_s Feststoffdichte [kg/m^3]
v_0 Anfangsgeschwindigkeit des Partikels relativ zur Luft [m/s]
η_L Viskosität der Luft [Pa s]

Der maximale Flugweg entspricht der Abbremsung der Partikel während des freien Fluges auf die Geschwindigkeit Null, hervorgerufen durch die Widerstandskräfte der Luft. Gleichung 2.2 ist zu entnehmen, dass der Flugweg proportional von Durchmesser und Geschwindigkeit der Teilchen abhängt. Zudem lässt sich der freie Flugweg durch Auswahl eines Strömungsfluids von geringer Viskosität sowie einer hohen Feststoffdichte verlängern.
Abbildung 2-5 zeigt den Einfluss des Partikeldurchmessers auf die mittlere freie Weglänge $\bar{\lambda}$ sowie den Flugweg s_0 bei verschiedenen Anfangsgeschwindigkeiten und Feststoffkonzentrationen von kugelförmigen Teilchen:

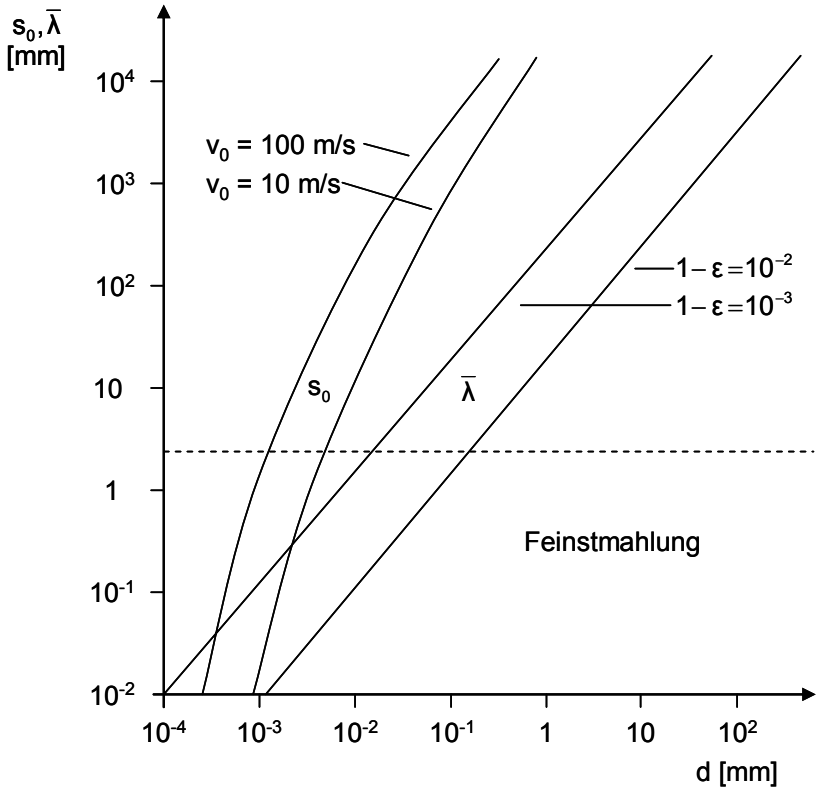


Abbildung 2-5: maximaler Flugweg und mittlere freie Weglänge in Abhängigkeit vom Partikeldurchmesser bei kugelförmigen Teilchen (ρ = 1g/cm^3) in ruhender Luft von 20°C [70]

Der Graphik ist zu entnehmen, dass die Wahrscheinlichkeit für einen gegenseitigen Stoß der Partikel steigt, wenn die mittlere freie Weglänge kleiner als der Abbremsweg ist. Bei abnehmendem Partikeldurchmesser nimmt auch die mittlere freie Weglänge ab. Da der maximale Flugweg jedoch vom Quadrat des Partikeldurchmessers abhängt, nimmt dieser mit kleinerem Durchmesser stärker ab, so dass zuerst weniger Stöße auftreten und schließlich keine mehr. Ist nun der Flugweg kleiner als die mittlere freie Weglänge, werden die Teilchen während des freien Flugs so stark abgebremst, dass keine ausreichend hohen Geschwindigkeiten für einen Zusammenstoß mehr erreicht werden. Bei zu geringem Durchmesser folgen sie der Bewegung der Luftströmung und werden nicht weiter beansprucht. Daher lassen sich Partikel in einer Spiralstrahlmühle nur bis zu einer bestimmten Grenzkorngröße zerkleinern, die nach Abbildung 2-5 ungefähr 10 µm beträgt.

Da Zerkleinerung von Häufigkeit und Intensität der Beanspruchung abhängt, kann sowohl über die Feststoffkonzentration als auch durch die Prallgeschwindigkeit Einfluss auf das Mahlergebnis genommen werden [39, 64]. Für den Betrieb einer Mühle muss gelten, dass ein ausreichend hoher Feststoffdurchsatz pro Zeiteinheit erfolgt, damit überhaupt Zusammenstöße von Partikeln wahrscheinlich sind. Bei einer Überladung der

Mühle kann es jedoch zum Abbremsen der Strömung kommen und folglich zum Erliegen eines erfolgreichen Zerkleinerungsprozesses. Eine Verbesserung des Zerkleinerungsergebnisses lässt sich ferner durch Steigerung des Mahldrucks erzielen [43, 85]. Daraus resultieren höhere Umfangsgeschwindigkeiten von weit mehr als 100 m/s, so dass die Teilchen verstärkt beschleunigt werden und mit höheren Geschwindigkeiten aufeinander prallen.

2.2.2 Bruchverhalten

Bei dem Zusammenprall zweier Partikel wird die Stoßenergie punktuell an der Kontaktstelle übertragen. Es kommt zunächst zu einer elastischen Verformung und der Ausbildung von Spannungsfeldern im Partikel [65]. Je nach Materialverhalten und Teilchengröße kann bei hoher lokaler Spannungskonzentration ein Anriss entstehen oder sogar ein Bruch ausgelöst werden [76, 83]. Die übertragene Energie wird optimal ausgenutzt, wenn der Bruch des Partikels sofort erfolgt.

Vorraussetzung zur Entstehung eines Risses ist die Erfüllung der differentiellen Bruchenergiebedingung [87]. Partikel können zunächst plastisch verformt werden oder Anrisse bekommen, die erst bei erneuter Beanspruchung die Bruchausbreitung begünstigen. Dies bedeutet, dass der durch den ersten Prall gespeicherte Energievorrat für einen Bruch nicht ausreicht. Der Bruch läuft erst vollständig durch den Partikel hindurch, wenn genügend gespeicherte, elastische Energie freigesetzt wird. Für die Rissausbreitung gilt daher die integrale Bruchenergiebedingung [69, 78, 86]. Aus diesem Grund ist eine Mindestgröße für das entsprechende Mahlgut erforderlich, damit die für den Bruch benötigte Energie gespeichert werden kann.

Wie bereits im vorherigen Kapitel angesprochen, lassen sich Stoffe unterhalb einer Grenzkorngröße nicht weiter zerkleinern, da sich die Partikel nur plastisch verformen [75]. Es entsteht kein Bruch, da die Beanspruchungsintensität für eine Zerkleinerung nicht ausreichend ist. Zudem zeigen die Partikel eine hohe Tendenz zur Agglomeration. Damit übt die Partikelgröße einen entscheidenden Einfluss auf die Bruchwahrscheinlichkeit aus [41]. Große Teilchen weisen zahlreiche Anrisse und Strukturfehler auf, an denen entlang sich Brüche leicht ausbreiten können. Kleine Teilchen sind dagegen in ihrem strukturellen Aufbau homogener, sie zeigen eine geringere Anzahl an Fehlstellen pro Volumeneinheit. Die Festigkeit ist erhöht, so dass die Partikel erst bei höheren Spannungen brechen. Folglich ist es notwendig, kleinere Teilchen mit höherer Geschwindigkeit zu beanspruchen, um sie weiter zu zerkleinern

[62]. Bei zu langsamer Aufprallgeschwindigkeit können Spannungen bereits abgebaut sein, bevor es zum Bruch kommt [39].

2.2.3 Zerkleinerungs- und Sichtungsvorgänge

Während des Betriebs der Spiralstrahlmühle kommt es zu einer Überlagerung von Zerkleinerungs- und Sichtungsvorgängen. Unzureichend zerkleinerte Pulverpartikel verbleiben durch Zentrifugalkräfte an der Mahlkammerperipherie, wo die Wahrscheinlichkeit für einen erneuten Stoß sehr hoch ist. Kleinere Teilchen setzen der zirkulierenden Strömung einen geringeren Widerstand entgegen und lassen sich daher leicht durch Zentripetalkräfte in die Mitte der Mahlkammer reißen, wo sie über das Tauchrohr ausgetragen werden. Dieser interne Sichtungsprozess darf nicht unabhängig von der Zerkleinerung der Partikel betrachtet werden. Eine bestmöglich erzielbare Feinheit des Mahlproduktes resultiert aus dem optimalen Zusammenwirken von effektiver Zerkleinerung sowie Sichtung mit hoher Trennschärfe [23].
Werden die Untersuchungen von Muschelknautz zur Abscheideleistung bei Zyklonen und Fliehkraftabscheidern zugrunde gelegt, lässt sich auch bei der Spiralstrahlmühle die Trennschärfe für die Sichtungsprozesse über dem Tauchrohr angeben [50, 51]. Besteht ein Gleichgewicht zwischen einwirkenden Zentrifugalkräften und Widerstandskräften, kann mit Hilfe des Stokes´ schen Gesetzes der Grenzkorndurchmesser d_g wie folgt definiert werden [5]:

$$d_g = \sqrt{\frac{18 \cdot \eta \cdot v_{r_i} \cdot r_i}{(\rho_s - \rho_g) \cdot u_i^2}} \tag{2.3}$$

d_g Grenzkorndurchmesser [m]
u_i Umfangsgeschwindigkeit [m/s]
v_{ri} Radialgeschwindigkeit [m/s]
η Viskosität des Gases [Pa s]
r_i Tauchrohrradius [m]
ρ_s Feststoffdichte [kg/m³]
ρ_g Gasdichte [kg/m³]

Partikel dieser Korngröße d_g werden jeweils zu 50% über das Tauchrohr abgeschieden bzw. in der Mahlkammer zurückgehalten und somit erneuter Beanspruchung unterworfen. Nach Gleichung 2.3 lässt sich ein feineres Mahlprodukt erreichen, indem der Tauchrohrradius hinreichend klein gewählt wird. Ein störungsfreies Abfließen der Strömung muss aber gewährleistet bleiben. Ferner kann ein geringer

Grenzkorndurchmesser durch eine verminderte Radialgeschwindigkeit v_{ri} auf dem Radius r_i oder über höhere Umfangsgeschwindigkeiten auf demselben Radius erzielt werden. Eine Erhöhung der Umfangsgeschwindigkeit wird durch kleinere Düsenanstellwinkel bewirkt, wie die durchgeführten Versuche von Muschelknautz [52] mit verändertem Düsenwinkel zeigen. Dadurch rotiert das Pulver auf äußeren Mahlkammerradien. Jedoch steigt die Möglichkeit, dass die Partikel vermehrt gegen die Wand stoßen, so dass die eingebrachte Energie nicht effektiv zur Zerkleinerung genutzt wird und verloren geht. Größere Anstellwinkel sind für einen erfolgreichen Sichtungsprozess von Vorteil, das Mahlgut erfährt mehr radiale Beschleunigung und wird stark in Richtung innerer Radien getrieben.

Abhängig von den geometrischen Abmessungen der eingesetzten Spiralstrahlmühle sowie des verwendeten Materials kann der optimale Düsenanstellwinkel erheblich variieren [2, 79].

Außerdem sind die angesprochenen Sichtungsvorgänge in Abhängigkeit von der Feststoffkonzentration zu betrachten, wie aus der graphischen Darstellung 2-6 erkennbar ist:

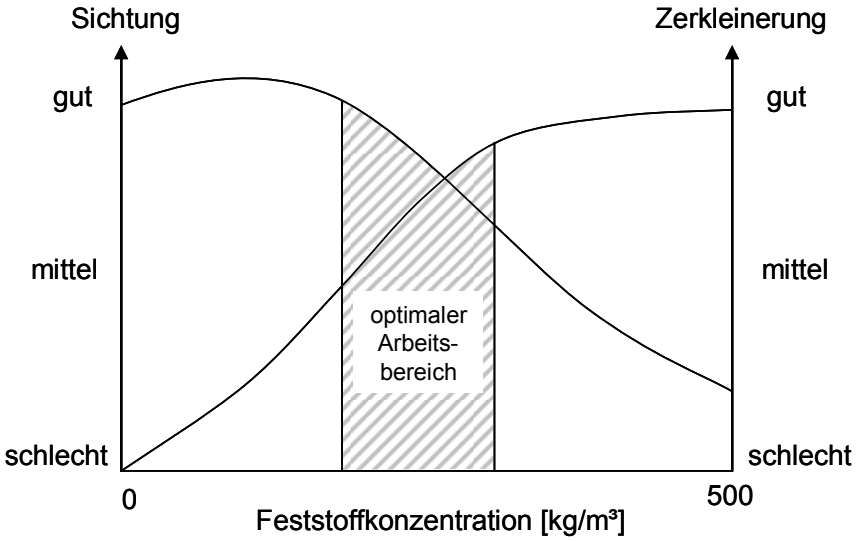


Abbildung 2-6: Arbeitsbereich einer Spiralstrahlmühle [4]

Eine erfolgreiche Zerkleinerung von Partikeln durch Prall in der Strahlmühle setzt einen gewissen Feststoffdurchsatz voraus. Mit steigender Feststoffkonzentration steigt auch die Zerkleinerungsintensität, somit stehen mehr Partikel für einen gegenseitigen Stoß zur Verfügung. Bei einer Überladung der Mühle mit Pulver wird die rotierende Strömung jedoch durch zunehmende Reibungseffekte stark abgebremst. Das

Zerkleinerungsergebnis verschlechtert sich, so dass Mahlprodukte mit breiter Korngrößenverteilung entstehen [49, 66].

Ein gegenläufiges Verhalten zeigt der Sichtungsprozess. Schon bei geringer Feststoffkonzentration lässt sich eine effektive Sichtung erkennen. Mit zunehmender Konzentration an Mahlgut wird, bedingt durch abnehmende Zentrifugalkräfte, die Sichtleistung verringert [73]. Feine Partikel können nicht mehr einzeln abgeschieden werden, sondern brechen auch mit grobem Feststoff unkontrolliert in sogenannten Gutsträhnen aus, da in der Strömung eine gleichmäßige Fluidisierung nicht mehr gelingt [37].

Die während der Mahlung eingebrachte Feststoffmenge spielt demnach hinsichtlich Zerkleinerung und Sichtung in der Spiralstrahlmühle eine entscheidende Rolle. Nur bei Beladung mit einer definierten Gutkonzentration kann die erforderliche Fluidisierung aller Partikel und daraus resultierend eine stabile Arbeitsweise der Mühle sichergestellt werden [64].

2.3 Strömungsvorgänge in der Spiralstrahlmühle

Seit jeher besteht großes Interesse an der genauen Kenntnis der Strömungsverhältnisse in der Spiralstrahlmühle, da diese äußerst vielschichtig und von zahlreichen Faktoren abhängig sind, wie bereits in vorangegangenem Kapitel erläutert. Ein weiterer wichtiger Faktor ist der Einfluss der Treibstrahlen auf die Strömungsvorgänge. Daher ist es zum erleichterten Verständnis notwendig, diesen Verlauf in verschiedenen Bereichen der Mühle genauer zu betrachten.

2.3.1 Treibstrahlverlauf

Abbildung 2-7 stellt den Verlauf der Treibstrahlen in der Spiralstrahlmühle schematisch dar:

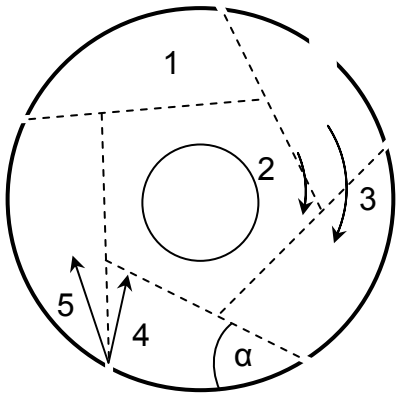


Abbildung 2-7: Aufsicht auf die Mahlkammer [66]
(1) Zerkleinerungszone (2) Sichtzone (3) zirkulierende Grundströmung (4) Vorderseite des Treibstrahls (5) Rückseite des Treibstrahls (α) Düsenanstellwinkel

Unter einem bestimmten Anstellwinkel (α) treten am Umfang der Mahlkammer Treibstrahlen aus fünf Düsen aus und quer in die zirkulierende Grundströmung (3) ein. Dadurch lässt sich deutlich eine periphere Zerkleinerungszone (1) von einer inneren Sichtzone (2) abgrenzen. In Strömungsrichtung ist zwischen Vorder- und Rückseite des Treibstrahls (4, 5) zu unterscheiden. Die Zerkleinerung der Partikel tritt bevorzugt auf der Treibstrahlrückseite auf, was sich folgendermaßen erklärt: Durch den Eintritt der Treibstrahlen in die mahlgutbeladene Strömung wird diese abgebremst, und es bildet sich auf der Strahlvorderseite eine Stauzone aus. Die Partikel können nicht bis zum Strahlkern vordringen. Statt dessen werden die Teilchen von der Querströmung zur Rückseite des Treibstrahls transportiert, wo die Wahrscheinlichkeit für gegenseitige Zusammenstöße besonders hoch ist.

Abbildung 2-8 zeigt vereinfacht eine spiralige Grundströmung, in die ein Treibstrahl quer eintritt:

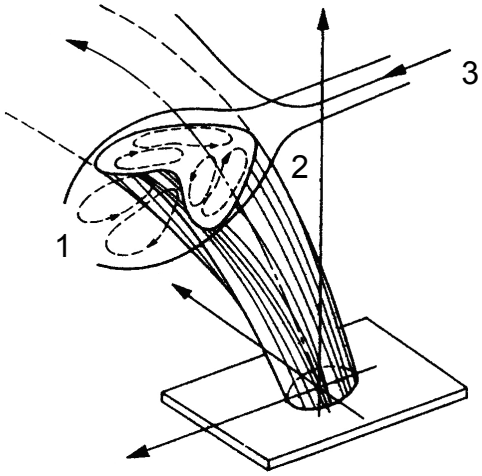


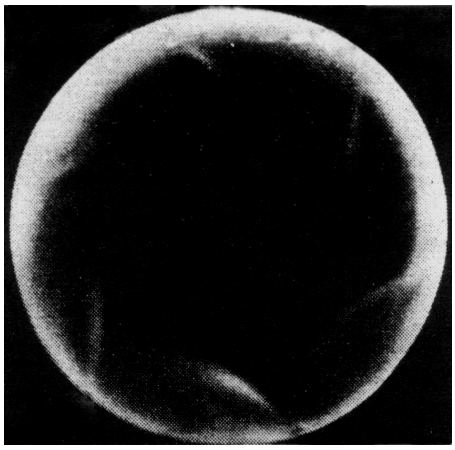
Abbildung 2-8: Strahlablenkung nach Abramowitsch [1]
(1) Rückseite des Treibstrahls (2) Vorderseite des Treibstrahls (3) zirkulierende Strömung

Durch das Eintreten des Treibstrahls (1, 2) in die zirkulierende Grundströmung (3) wird diese in ihrer Geschwindigkeit abgebremst. An der Strahlvorderseite (2) kommt es daher zur Bildung einer Stauzone mit dem Auftreten eines lokalen Überdruckgebietes, auf der Strahlrückseite (1) entsteht dagegen ein lokales Unterdruckgebiet. Um die Druckverhältnisse zu kompensieren, wird Luft aus der Grundströmung angesaugt. Als Folge verformt sich der Treibstrahl nierenförmig und wird durch den Einfluss von Scherkräften und des entstehenden Druckfeldes von seinem ursprünglichen Verlauf abgelenkt. Im Unterdruckgebiet auf der Strahlrückseite bilden sich zahlreiche Wirbel und heftige Turbulenzen. Da die Feststoffteilchen von der Grundströmung mitgerissen werden, steigt die Wahrscheinlichkeit für einen Stoß auf der Strahlrückseite stark an.
Mit Hilfe von tribolumineszierenden Substanzen lässt sich ein Bild der Strömung in der Spiralstrahlmühle zeichnen und weiterführende Erkenntnisse gewinnen, an welchen Stellen in der Spiralstrahlmühle Zerkleinerung stattfindet.

2.3.2 Untersuchungen mit tribolumineszierenden Substanzen

Kürten [35 - 38] hat bei der Zerkleinerung von bestimmten kristallinen Stoffen starke Leuchterscheinungen im Dunkeln beobachten können. Das Phänomen der Triboluminеszenz beruht auf elektrischen Entladungsvorgängen, die zwischen den entstehenden Bruchflächen auftreten. Sobald Luft in den Bruchspalt eintritt, hört das Leuchten auf. Während des Zerkleinerns von Modellsubstanzen, wie z. B. von Mangan-

aktiviertem Zinksulfid und von Zucker kann eine hohe Tribolumineszenzintensität bemerkt werden. In den Bereichen der Mühle, wo vermehrter Prall der Teilchen stattfindet, zeigt sich eine starke Leuchtemission. Die ausgesandte Lichtmenge ist proportional zur neugeschaffenen Oberfläche, so dass neben qualitativen auch quantitative Aussagen über die Zerkleinerung möglich sind. Effektive Zerkleinerungsbedingungen lassen sich erzielen, wenn die Teilchen, wie Untersuchungen mit Gas-Feststoff-Strahlen zeigen, unter einem Stoßwinkel von 180° aufeinanderprallen. Dieser Zustand wird jedoch in der Spiralstrahlmühle kaum erreicht.
Die Abbildungen 2-9 und 2-10 zeigen Bilder von tribolumineszierenden Substanzen, die bei unterschiedlicher Feststoffbeladung der Mühle aufgenommen wurden:



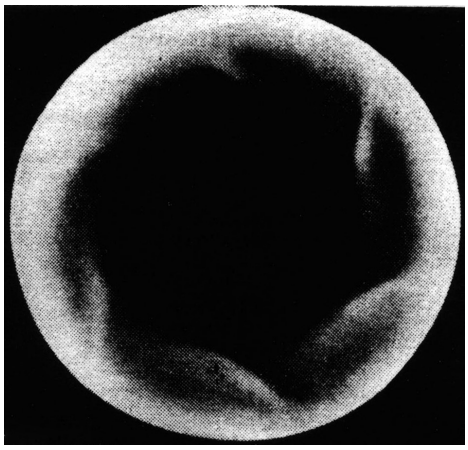


Abbildung 2-9 (links): Aufnahme mit tribolumineszierenden Substanzen,
Spiralstrahlmühle mit 1 mm Düsendurchmesser, geringe Gutbeladung [36]

Abbildung 2-10 (rechts): Aufnahme mit tribolumineszierenden Substanzen,
Spiralstrahlmühle mit 1 mm Düsendurchmesser, hohe Gutbeladung

Bei geringer Gutbeladung lässt sich verstärkte Leuchtaktivität in einem geschlossenen Ring an der Mahlkammerperipherie ausmachen. Hier zirkulieren die Partikel entlang des Umfangs und prallen aufeinander. Zudem fällt auf, dass Zerkleinerung in den aus sechs Düsen austretenden Treibstrahlen stattfindet. In der Mitte der Mahlkammer hingegen lässt sich kein Leuchten beobachten. So kann eindeutig zwischen einer Zerkleinerungszone am äußeren Umfang und einer Sichtzone auf kleinen Radien der Mahlkammer unterschieden werden.
Bei erhöhter Gutbeladung der Strahlmühle findet Zerkleinerung nicht nur an der Peripherie, sondern in der gesamten Zerkleinerungszone statt. Besonders hervorzuheben ist der Eintritt der Treibstrahlen in die rotierende Grundströmung. Die Zunahme der Leuchtintensität lässt vermuten, dass die Partikel auch auf der Treibstrahlvorderseite gegeneinander stoßen.

Weitere Aufnahmen von tribolumineszierenden Substanzen zeigen den Einfluss des Düsenanstellwinkels auf die Strömungsvorgänge [49, 53]. Bei kleinem Anstellwinkel erfolgt deutliche Zerkleinerung fast nur an peripheren Radien, und die Wahrscheinlichkeit für einen Aufprall der Partikel gegen die Mahlkammerwand steigt. Je größer der Anstellwinkel gewählt wird, desto mehr verlagert sich die Zerkleinerung in Richtung der inneren Sichtzone. Wird der Anstellwinkel für die Strahlmühle jedoch zu groß gewählt, gelangen zahlreiche unzerkleinerte Teilchen mit der abfließenden Strömung in das Tauchrohr, vgl. Kapitel 2.2.3.
Die Aufnahme von weiteren Tribolumineszenzphänomenen gelingt bei der Vergrößerung des Düsendurchmessers von 1 mm auf 4 mm, wie Abbildung 2-11 bei geringer Gutbeladung zeigt:

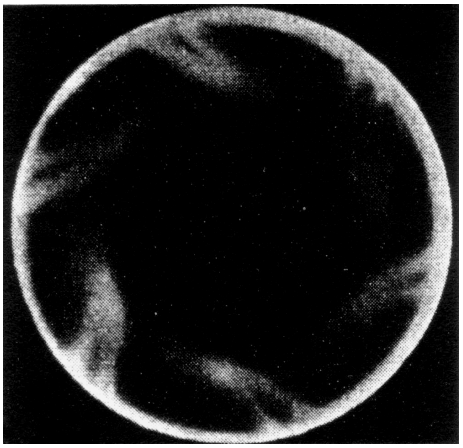


Abbildung 2-11: Aufnahme mit tribolumineszierenden Substanzen,
Spiralstrahlmühle mit 4 mm Düsendurchmesser, geringe Gutbeladung [36]

Die Treibstrahlen lassen sich demnach eindeutig in Vorder- und Rückseite einteilen, siehe auch Abbildung 2-7. Vermehrte Zerkleinerung erfolgt unter diesen Bedingungen auf der Vorderseite, im Strahlkern dagegen kann kein Leuchten beobachtet werden. Aufgrund des vergrößerten Düsendurchmessers besitzen die Treibstrahlen einen größeren Massenfluss und werden beim Auftreffen auf die Grundströmung in Richtung dieser zirkulierenden Strömung abgelenkt.

2.3.3 “Drei-Ebenen-Modell“

In ihren Arbeiten beschreiben Kürten und Rumpf [36, 38] verschiedene optische Verfahren zur Sichtbarmachung der Spiralströmung. Dazu wird die Mühle mit Glas- bzw. Plexiglasdeckeln ausgestattet, um mit einer Kamera visuell den Strömungsverlauf zu verfolgen. Neben den Aufnahmen mit tribolumineszierenden Substanzen werden erste

Versuche mit Tusche und Tinte in Wasser durchgeführt, in späteren Untersuchungen auch Aufschlämmungen von Ruß in Petrolether verwendet. Im Folgenden soll das aus diesen Experimenten hervorgegangene “Drei-Ebenen-Modell“ mit seinen einzelnen Ebenen genauer betrachtet werden:

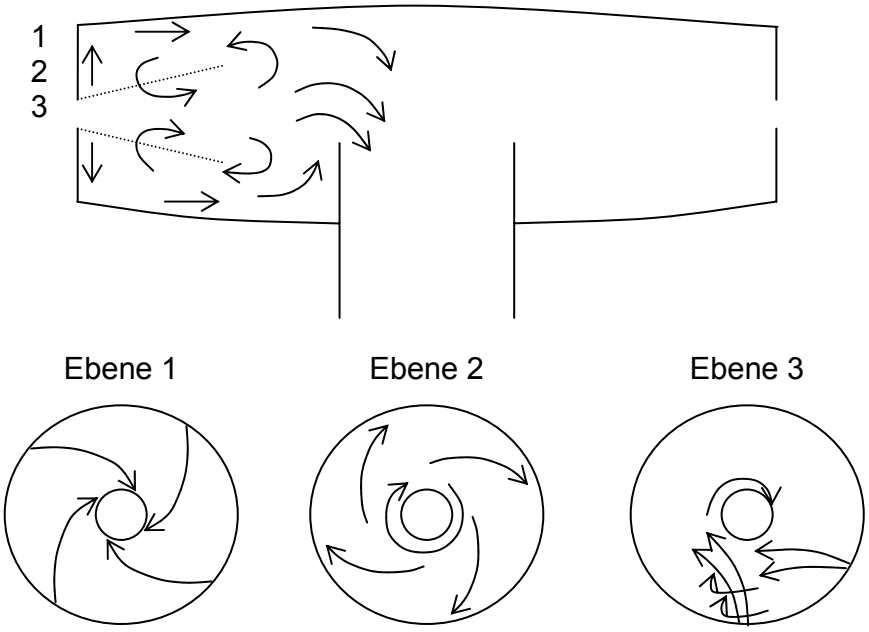


Abbildung 2-12: Strömungsverläufe nach dem von Kürten und Rumpf aufgestellten “Drei- Ebenen- Modell“ [36]

Das Strömungsmedium tritt über die Treibstrahldüsen am Umfang tangential in die Mahlkammer ein. Wie noch genauer in Kapitel 2.4.3.1 erläutert wird, weitet sich dieser Treibstrahl auf, hier durch die mit Punkten gekennzeichnete Linie dargestellt. Über das Tauchrohr kann die Strömung aus jeder Ebene der Kammer abfließen.

Ebene 1 bezeichnet nach Kürten und Rumpf die Strömung unterhalb des Mahlkammerdeckels. In der Aufsicht zeigt sich deutlich ein radial zum Tauchrohr gerichteter Verlauf. In der Düsenebene, Ebene 3, bestimmen hauptsächlich die Treibstrahlen den Verlauf der Strömung. Wie bereits in Kapitel 2.3.1 erläutert, werden die Treibstrahlen beim Auftreffen auf die rotierende Grundströmung in Strömungsrichtung abgelenkt und nierenförmig verformt. Auf der Strahlrückseite bilden sich starke Wirbel und Turbulenzen. Zur Kompensation des entstehenden Unterdrucks wird aus dem umgebenden Raum Strömungsmedium angesaugt. Aus Kontinuitätsgründen strömt deshalb Fluid zurück zur Mahlkammerperipherie, wie die Darstellung der Ebene 2 zeigt. In diesem Bereich, also direkt ober- bzw. unterhalb des Treibstrahls, ist daher eine Rückströmung in das Unterdruckgebiet der Zerkleinerungszone an äußeren Mahlkammerradien zu beobachten. In der Sichtzone dagegen, auf kleinen Radien, fließt die Fluidströmung in Richtung des Tauchrohres.

2.4 Theoretische Betrachtung der Strömung in der Spiralstrahlmühle

Im folgenden Kapitel erfolgt eine Beschreibung der Strömungsverhältnisse in der Strahlmühle. Es wird zudem darauf eingegangen, wie sich aus Druckmessungen Informationen über das vorliegende Strömungsfeld gewinnen lassen. Die zur Berechnung von Geschwindigkeiten notwendigen Gleichungen werden im Anschluss vorgestellt. Eine genaue Darstellung der verwendeten Messtechnik ist Kapitel 4.2 zu entnehmen.

2.4.1 Bernoulli-Gleichung

Die Bernoulli-Gleichung 2.4 beschreibt die Beziehung zwischen Druck und Geschwindigkeit von Fluidströmungen:

$$p_{ges} = p_{stat} + p_{dyn} = p_{stat} + \frac{1}{2} \rho \, v^2 = \text{const} \qquad (2.4)$$

p_{ges} Gesamtdruck [Pa]
p_{stat} statischer Druck [Pa]
p_{dyn} dynamischer Druck [Pa]
ρ Dichte des Strömungsmediums [kg/m³]
v Strömungsgeschwindigkeit [m/s]

Unter Annahme der Energiebedingungen $E_{kin} + E_{pot} = \text{const}$ entspricht die kinetische Energie eines strömenden Fluids dem dynamischen Druck. Dieser entsteht erst bei der Bewegung des Fluids und nimmt im gleichen Maße zu, wie der statische Druck abnimmt. Der statische Druck entspricht der potentiellen Energie der Strömung. Nach Bernoulli ist demnach der Gesamtdruck einer Strömung als Summe von statischem und dynamischem Druck konstant.

2.4.2 Statischer Druckverlauf

In der Strahlmühle zirkulieren die Pulverteilchen auf gekrümmten Strömungsbahnen mit jeweils unterschiedlichen Radien r. Der angreifenden Fliehkraft wirkt eine nach innen gerichtete Druckkraft entgegen [6, 53]. Unter Vernachlässigung der Wandreibung gilt für die radialen Druckverhältnisse die folgende Gleichung:

$$\frac{dp}{dr} = -\rho_L \cdot \frac{u^2}{r} \qquad (2.5)$$

p Druck [Pa]
r Radius [m]
ρ_L Luftdichte [kg/m³]
u Umfangsgeschwindigkeit [m/s]

Gleichung 2.5 zeigt die Abhängigkeit der radialen Druckverhältnisse von der Luftdichte, dem Radius und vor allem der Umfangsgeschwindigkeit.
Ausgehend von den Verhältnissen bei Zyklonabscheidern befasste sich Muschelknautz [51, 52] als erster damit, den statischen Druck in der Spiralstrahlmühle zu messen. Dieser kann mit Hilfe einer Wandbohrung, über die das zu untersuchende Fluid im Mahlkammerdeckel strömt, erfasst werden.
Abbildung 2-13 zeigt die erhaltenen statischen Druckkennlinien sowie die mit Flügelrädchen aufgenommenen Umfangsgeschwindigkeiten als Funktion des Radius. Dabei wurden sowohl die Feststoffbeladung (μ) als auch der Düsenanstellwinkel (α) der Strahlmühle verändert. Für die Gutbeladung ist das folgende Verhältnis anzunehmen:

$$\mu = \frac{\dot{m}_S}{\dot{m}_L} \qquad (2.6)$$

μ Feststoffbeladung [-]
$\dot{m}_S$ Feststoffmassenstrom [kg/s]
$\dot{m}_L$ Gasmassenstrom [kg/s]

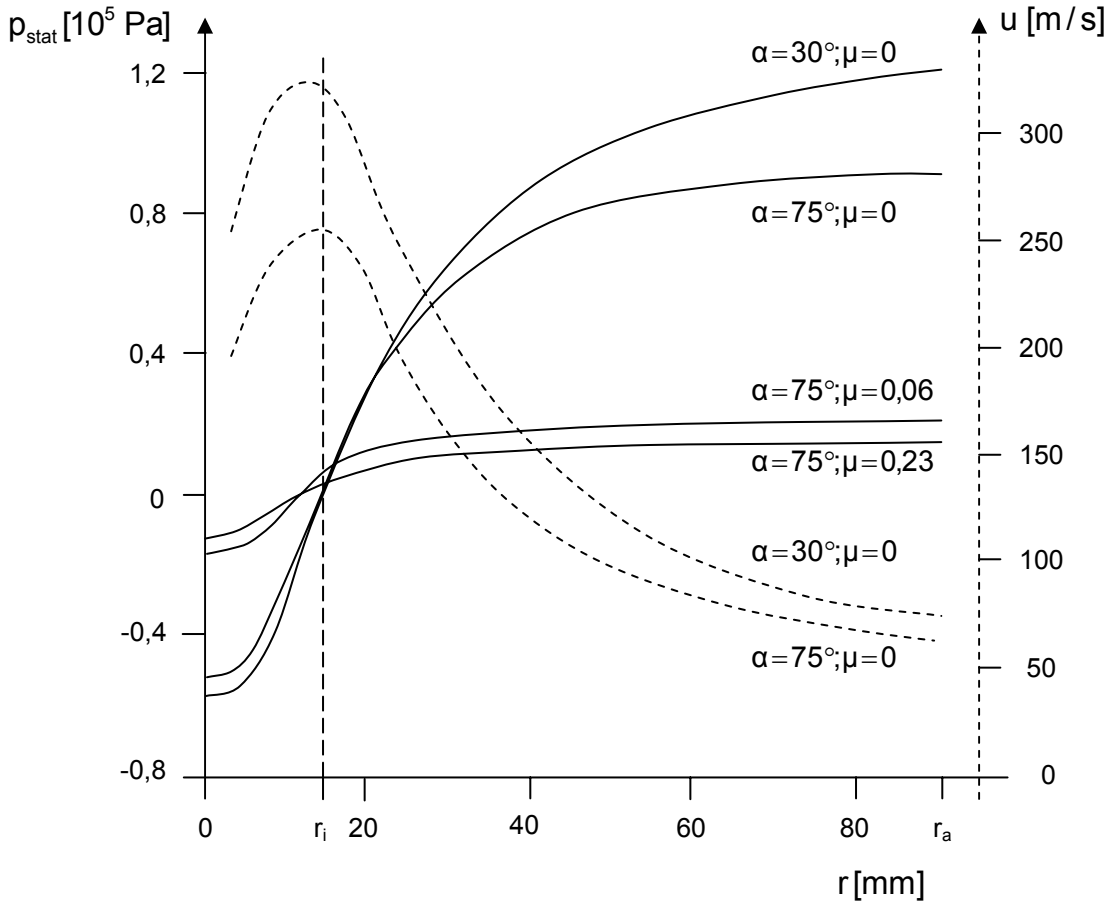


Abbildung 2-13: Verlauf des statischen Drucks und der Umfangsgeschwindigkeit über dem Radius einer Spiralstrahlmühle bei der Zerkleinerung von Zucker [52]

An Hand dieser Graphik lässt sich eine Abhängigkeit des statischen Drucks sowie der Umfangsgeschwindigkeit vom Radius der Spiralstrahlmühle klar erkennen. Ohne Feststoffzusatz nimmt der statische Druck vom äußeren Mahlkammerradius r_a bis zum Tauchrohrradius r_i ab, die Umfangsgeschwindigkeit jedoch zu. Der maximale Geschwindigkeitswert wird direkt über dem Tauchrohrradius gemessen. Innerhalb des Tauchrohres kann die zur Austragung der Pulverteilchen notwendige Drucksenke beobachtet werden, so dass sowohl die statischen Druckwerte als auch die dort gemessenen Umfangsgeschwindigkeiten wieder abfallen. Mit steigender Feststoffbeladung ändert sich der Kurvenverlauf nur wenig. Über den Radius hinweg ist der statische Druck fast konstant. Die Werte des statischen Drucks sind jedoch insgesamt niedriger als im Leerbetrieb, da die Grundströmung durch vermehrte Reibungseffekte und Impulsaustausch der Partikel abgebremst wird.

Ferner darf der Einfluss des Düsenanstellwinkels α nicht unberücksichtigt bleiben. Durch einen kleinen Anstellwinkel werden hohe Umfangsgeschwindigkeiten erzielt. Die Teilchen werden nur über kurze Wege radial beschleunigt und verbleiben daher

vermehrt an der Mahlkammerperipherie. Dementsprechend ist der dort gemessene statische Druck auch höher. Bei größeren Anstellwinkeln treten in der Zerkleinerungszone längere radiale Beschleunigungsstrecken auf, die dortige Umfangsgeschwindigkeit nimmt ab. Diese mit Zucker durchgeführten Messungen stehen mit den Bildaufnahmen im Einklang, die bereits in Abschnitt 2.3.1 erläutert wurden.

2.4.3 Messung des Gesamtdrucks mittels Pitot-Rohr

Betrachtet man eine gleichförmige Fluidströmung, die ein Hindernis umfließt, bildet sich direkt vor dem Hindernis ein Staupunkt aus. In diesem Zustand wird die kinetische Energie in Druck umgewandelt, und die Geschwindigkeit nimmt den Wert Null an. Zur Erklärung dieser Strömungsvorgänge dient Abbildung 2-14:

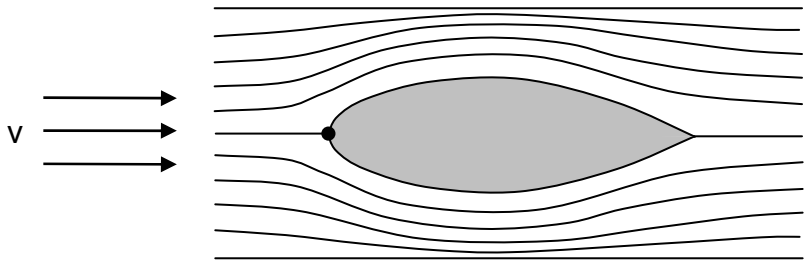


Abbildung 2-14: Strömung um ein Hindernis

Als ein derartiges Hindernis kann ebenso ein Stau- oder Pitot-Rohr angesehen werden, das in einer Fluidströmung von vorn angeströmt wird. Dadurch bildet das Pitot-Rohr in seinem Sondenkopf einen Staupunkt aus, wie Abbildung 2-15 veranschaulicht:

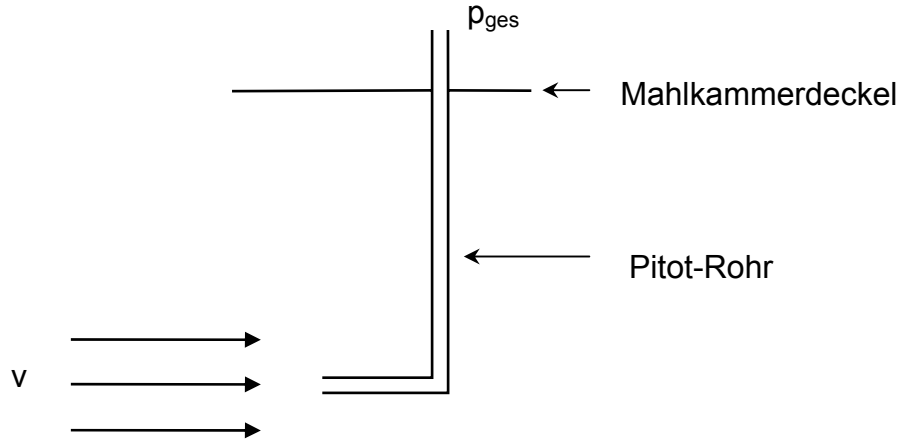


Abbildung 2-15: Messung des Gesamtdrucks in der Spiralstrahlmühle mittels Pitot-Rohr

Der Druck im Staupunkt entspricht dabei dem Gesamtdruck, der direkt durch das Rohr an einen Druckaufnehmer geleitet wird [21].
Entsprechend der Bernoulli-Gleichung 2.4 kann der Staudruck oder dynamische Druck zur Berechnung von Strömungsgeschwindigkeiten herangezogen werden. Eine direkte Erfassung ist jedoch nicht möglich. Nur über Differenzmessungen von Gesamt- und statischem Druck lässt sich der Staudruck korrekt bestimmen.

2.4.3.1 Eigenschaften der Strömung in der Spiralstrahlmühle

Bei der Betrachtung der Fluidströmung in der Spiralstrahlmühle wird angenommen, dass die Strömung stationär verläuft, d. h. Kenngrößen wie Druck, Dichte, Geschwindigkeit und Temperatur sich in Abhängigkeit von der Zeit nicht ändern. Ferner ist davon auszugehen, dass keine Energieverluste durch Reibung oder Wärme auftreten. Zudem verhält sich die Strömung wie ein ideales Gas mit konstanten spezifischen Wärmekapazitäten, so dass der Isentropenkoeffizient 1,405 für Luft beträgt.

$$\kappa = \frac{c_P}{c_V} \tag{2.7}$$

κ Isentropenkoeffizient [-]
c_p spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck [$m^2/(s^2\ K)$]
c_v spezifische Wärmekapazität bei konstantem Volumen [$m^2/(s^2\ K)$]

Dichte und Druck eines idealen Gases sind isentrop über die folgende Gleichung miteinander verbunden:

$$\frac{p}{\rho^{\kappa}} = \text{const} \tag{2.8}$$

p Druck des Gases [Pa]
ρ Dichte des Gases [kg/m^3]
κ Isentropenkoeffizient [-]

Bei den hohen vorherrschenden Geschwindigkeiten ist außerdem von größeren Dichteänderungen des Gases auszugehen, so dass auch Kompressibilitätseffekte berücksichtigt werden müssen [6, 30, 61, 77]. Eng verknüpft mit diesen Einflüssen ist auch die Machzahl, die als Verhältnis der Geschwindigkeit zur Schallgeschwindigkeit definiert wird:

$$Ma = \frac{v}{a} = \frac{v}{\sqrt{(\kappa R_L T)}} = \frac{v}{\sqrt{\left(\kappa \frac{p}{\rho}\right)}} \tag{2.9}$$

Ma	Machzahl [-]
v	Strömungsgeschwindigkeit [m/s]
a	Schallgeschwindigkeit [m/s]
κ	Isentropenkoeffizient [-]
R_L	spezifische Gaskonstante Luft [287,22 J/(kg K)]
T	Temperatur [K]
p	Druck des Gases [Pa]
ρ	Dichte des Gases [kg/m^3]

Die Schallgeschwindigkeit für Luft beträgt entsprechend Tabelle 2-1 ca. 334 m/s und wird mit Mach 1 angegeben.

Ma < 1	Unterschallbereich
Ma = 1	Schallgeschwindigkeit
Ma > 1	Überschallbereich

Tabelle 2-1: Einteilung von Strömungsbereichen nach der Machzahl [21]

Unterhalb einer Machzahl von 0,3 im Unterschallbereich gilt eine Strömung als inkompressibel, daher ist der Einfluss der Schallgeschwindigkeit zu vernachlässigen. Ab Mach 0,3 bei Luft, also einer Geschwindigkeit von ungefähr 100 m/s, müssen jedoch Kompressibilitätseffekte berücksichtigt werden.
Weiterhin gelten in der betrachteten Strömung Kontinuitätsbedingungen, nach denen der Massenstrom in jedem beliebigen Stromquerschnitt konstant bleibt. Entsprechend der Kontinuitätsgleichung 2.10 ist der in eine Stromröhre eintretende Massenfluss (Index 1) gleich dem austretenden Massenfluss (Index 2).

$$\dot{m} = \rho_1 \cdot v_1 \cdot A_1 = \rho_2 \cdot v_2 \cdot A_2 = \text{const} \tag{2.10}$$

$\dot{m}$	Gasmassenstrom [kg/s]
$\rho_{1,2}$	Dichte des Gases [kg/m^3]
$v_{1,2}$	Strömungsgeschwindigkeit [m/s]
$A_{1,2}$	Düsenquerschnittsfläche [m^2]

Abbildung 2-16 veranschaulicht die Kontinuitätsbedingungen. Ein Fluid mit den Ausgangszuständen (Index 0) tritt in eine Stromröhre, in diesem Fall in einen Diffusor, mit den Eingangsbedingungen (Index 1) ein und mit den Austrittsbedingungen (Index 2) aus.

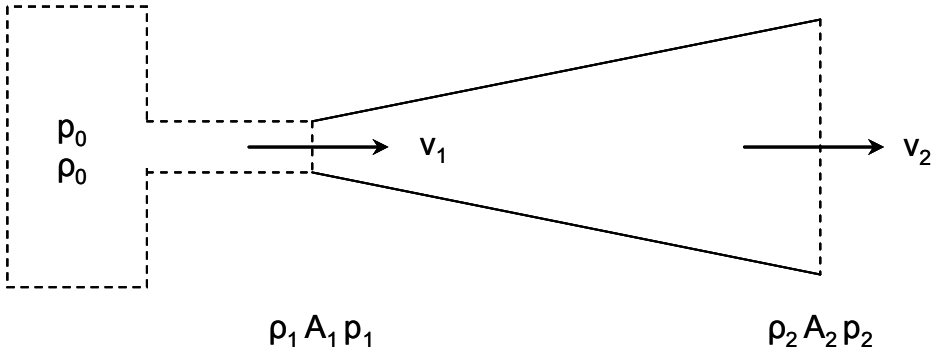


Abbildung 2-16: Querschnitt durch eine Stromröhre [21]

Die Geschwindigkeit verhält sich im Unterschallbereich demnach umgekehrt proportional zum zugehörigen Querschnitt. Die Durchflussgeschwindigkeit erhöht sich, wenn der Querschnitt verengt wird bzw. verlangsamt sich, wenn der Querschnitt aufgeweitet wird. Bei gleichem Querschnitt bleibt auch die Geschwindigkeit konstant.
Die Kontinuitätsgleichung gilt sowohl im Unterschall- als auch im Überschallbereich, jedoch verhält sich die Strömung unterschiedlich in Abhängigkeit von der Querschnittsänderung, wie die nachfolgende Tabelle 2-2 zeigt:

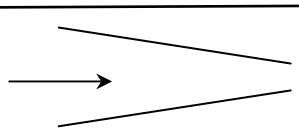
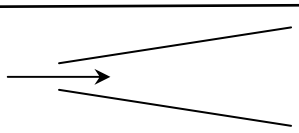
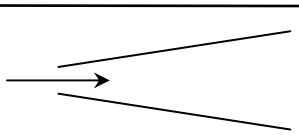
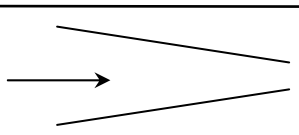
	Unterschall	**Überschall**
	Ma < 1	**Ma > 1**
v ↑ p ↓ ρ ↓		
v ↓ p ↑ ρ ↑		

Tabelle 2-2: Vergleich von Unterschall- und Überschallströmungen [21]

Im Unterschallbereich strömt das Gas zunächst durch einen konvergenten Einlaufteil. Der Düsenquerschnitt verengt sich, die Geschwindigkeit steigt und gemäß der Bernoulli-Gleichung sinken Druck und Dichte. Bei zunehmendem Querschnitt sinkt dagegen die Geschwindigkeit, Druck und Dichte steigen an. Ein gegensätzliches Verhalten tritt bei Strömungen im Überschallbereich auf.

Tabelle 2-3 fasst die notwendigen Voraussetzungen für die Betrachtung der Strömung in der Spiralstrahlmühle noch einmal zusammen [26]:

stationär	$\partial v / \partial t = 0$
adiabat	Q = 0
keine Energiezufuhr	W = 0
reibungsfrei	η = 0
ideales Gas	c_p und c_v konstant
kompressibel	Δρ > ± 5%
Unterschallströmung	Ma < 1
Kontinuitätsbedingungen sind erfüllt	$\dot{m} = \rho \cdot v \cdot A = \text{const}$

Tabelle 2-3: Annahmen bei der Betrachtung der Strömung in der Spiralstrahlmühle [26]

In die Spiralstrahlmühle muss ein hoher Energieeintrag erfolgen, damit die Wahrscheinlichkeit für häufigen Aufprall der Partikel steigt und dadurch effektive Zerkleinerung ermöglicht wird, siehe Kapitel 2.2.1. Das Mahlgas liefert die kinetische Energie für die Beschleunigung der Teilchen und wird durch den aus der Druckluftleitung in die Mahlkammer austretenden Gasmassenstrom vorgegeben. Daher ist eine nähere Betrachtung dieser Ausströmungsvorgänge für die Treibstrahlen erforderlich. Für die Ausströmgeschwindigkeit gilt die Gleichung nach Saint-Venant und Wantzel [6]:

$$v_1 = \sqrt{2 \cdot \frac{\kappa}{\kappa - 1} \cdot \frac{p_0}{\rho_0} \left[1 - \left(\frac{p_1}{p_0} \right)^{\frac{\kappa - 1}{\kappa}} \right]} \tag{2.11}$$

v_1 Ausströmgeschwindigkeit [m/s]
κ Isentropenkoeffizient [-]
p_0 Druck des Gases in der Zuluftleitung [Pa]
p_1 Druck des Gases in der Mahlkammer [Pa]
ρ_0 Dichte des Gases in der Zuluftleitung [kg/m^3]

Entsprechend den Kontinuitätsbedingungen, vgl. Gleichung 2.10, ist der aus den Treibstrahldüsen theoretisch austretende Massenstrom nicht nur von der Ausströmgeschwindigkeit, der Dichte des Mahlgases sowie der Düsenfläche abhängig, sondern wird entscheidend vom Druckverhältnis in Zuluftleitung und Mahlkammer beeinflusst. Unter Berücksichtigung dieses Druckverhältnisses p_1/p_0 kann für den theoretischen Gasmassenstrom die folgende Gleichung 2.12 formuliert werden:

$$\dot{m}_{th} = A \cdot \sqrt{2 \cdot \rho_0 \cdot p_0} \cdot \sqrt{\frac{\kappa}{\kappa - 1}\left[\left(\frac{p_1}{p_0}\right)^{\frac{2}{\kappa}} - \left(\frac{p_1}{p_0}\right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa}}\right]} \tag{2.12}$$

$\dot{m}_{th}$ theoretischer Gasmassenstrom [kg/s]
A Düsenquerschnittsfläche [m^2]
ρ_0 Dichte des Gases in der Zuluftleitung [kg/m^3]
p_0 Druck des Gases in der Zuluftleitung [Pa]
κ Isentropenkoeffizient [-]
p_1 Druck des Gases in der Mahlkammer [Pa]

Der zweite Wurzelausdruck lässt sich durch die Ausflussfunktion Ψ darstellen, so dass vereinfachend gilt:

$$\dot{m}_{th} = A \cdot \sqrt{2 \cdot \rho_0 \cdot p_0} \cdot \Psi \tag{2.13}$$

$\dot{m}_{th}$ theoretischer Gasmassenstrom [kg/s]
A Düsenquerschnittsfläche [m^2]
Ψ Ausflussfunktion [-]
ρ_0 Dichte des Gases in der Zuluftleitung [kg/m^3]
p_0 Druck des Gases in der Zuluftleitung [Pa]

Die Ausflussfunktion kann gegen das Druckverhältnis p_1/p_0 aufgetragen werden, dabei ergibt sich ein parabolischer Kurvenverlauf. Bei einem bestimmten Druckverhältnis von 0,528 für κ = 1,405 (Luft), siehe auch Gleichung 2.7, wird der Ausfluss maximal. Dieses kritische Verhältnis lässt sich mit Hilfe der nachfolgenden Gleichung 2.14 beschreiben:

$$\frac{p^*}{p_0} = \left(\frac{2}{\kappa + 1}\right)^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}} \tag{2.14}$$

p^* kritischer Druck [Pa]
p_0 Druck des Gases in der Zuluftleitung [Pa]
κ Isentropenkoeffizient [-]

Genau bei dieser kritischen Druckgröße nimmt die Treibstrahlgeschwindigkeit Schallgeschwindigkeit an, d. h. Mach 1 wird erreicht. Bei Unterschreiten des kritischen Druckverhältnisses bleibt der Ausflussvorgang auf dem maximalen Wert und ändert sich nicht mehr.

Ein analoger Kurvenverlauf ergibt sich bei der Darstellung des theoretischen Gasmassenstroms in Abhängigkeit des Druckverhältnisses p_1/p_0, vgl. Abbildung 2-17:

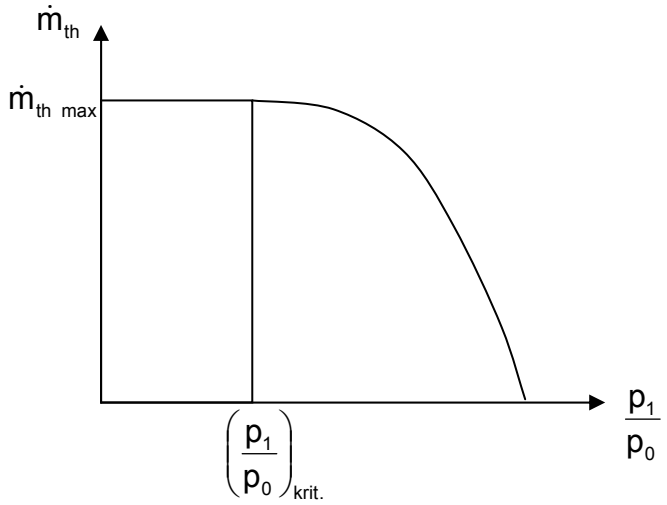


Abbildung 2-17: Zusammenhang zwischen dem ausströmenden Gasmassenstrom und dem Druckverhältnis p_1/p_0 [6]

Bei abnehmendem Druckverhältnis im Unterschallbereich steigt der Gasmassenstrom bis auf einen maximalen Wert an. Dieser wird exakt bei dem kritischen Druckverhältnis erreicht. Erst hier strömt das Gas mit Schallgeschwindigkeit. Im weiteren Kurvenverlauf zeigt sich, dass trotz weiterer Drucksenkung der Gasmassenstrom im Treibstrahl konstant maximal bleibt und damit unabhängig vom Druck in der Mahlkammer ist. Der Strahl strömt überkritisch aus der Düse aus und platzt hinter der Düsenmündung weit auf, vgl. Abbildung 2-12 [4].

2.4.3.2 “Kompressible Bernoulli-Gleichung“

Die einfache Bernoulli-Gleichung 2.4 gilt für die Beschreibung von Druck- und Geschwindigkeitsverhältnissen inkompressibler Strömungen. Für die Berechnung der in der Spiralstrahlmühle vorherrschenden Geschwindigkeiten ist es jedoch notwendig, Dichteänderungen des Fluids zu berücksichtigen. Dazu werden zwei energetische Zustände (Indices 1 und 2) eines idealen Gases in einer Strömung betrachtet, für die nach der Energiegleichung der folgende Zusammenhang gilt [1]:

$$\frac{v_1^2}{2} + \frac{\kappa}{\kappa - 1}\frac{p_1}{\rho_1} = \frac{v_2^2}{2} + \frac{\kappa}{\kappa - 1}\frac{p_2}{\rho_2} \tag{2.15}$$

$v_{1,2}$ Geschwindigkeit [m/s]
κ Isentropenkoeffizient [-]
$p_{1,2}$ Druck des Gases [Pa]
$\rho_{1,2}$ Dichte des Gases [kg/m^3]

Für die auftretenden Geschwindigkeiten lässt sich mit Hilfe der Isentropengleichung 2.8 folgende Beziehung formulieren:

$$v_2^2 - v_1^2 = \frac{2\kappa}{\kappa - 1}\left[\frac{p_1}{\rho_1} - \frac{p_2}{\rho_2}\right] = \frac{2\kappa}{\kappa - 1}\frac{p_1}{\rho_1}\left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}\right] \tag{2.16}$$

$v_{1,2}$ Geschwindigkeit [m/s]
κ Isentropenkoeffizient [-]
$p_{1,2}$ Druck des Gases [Pa]
$\rho_{1,2}$ Dichte des Gases [kg/m^3]

Unter Berücksichtigung der Definition für die Machzahl, vgl. Gleichung 2.9, kann für die Druckverhältnisse dann angegeben werden:

$$\frac{p_2}{p_1} = \left[1 + \frac{\kappa - 1}{2}\,Ma^2\left(1 - \frac{v_2^2}{v_1^2}\right)\right]^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} \tag{2.17}$$

$p_{1,2}$ Druck des Gases [Pa]
κ Isentropenkoeffizient [-]
Ma Machzahl [-]
$v_{1,2}$ Geschwindigkeit [m/s]

Im Staupunkt wird die Strömung auf die Geschwindigkeit $v_2 = 0$ abgebremst. Der dort herrschende Druck p_2 lässt sich durch den Gesamtdruck und p_1 durch den statischen Druck ersetzen, um die “kompressible Bernoulli-Gleichung“ aufzustellen [1, 56, 58]:

$$\frac{p_{ges}}{p_{stat}} = \left(1 + \frac{\kappa - 1}{2}Ma^2\right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} \tag{2.18}$$

p_{ges} Gesamtdruck [Pa]
p_{stat} statischer Druck [Pa]
Ma Machzahl [-]
κ Isentropenkoeffizient [-]

In diese für die vorliegende Arbeit relevante Gleichung 2.18 sind Messwerte für Gesamt- und statischen Druck einzusetzen, um anschließend mit Hilfe von Gleichung 2.9 die lokale Geschwindigkeit für eine kompressible Strömung in der Strahlmühle zu berechnen.

3 Arbeitshypothese

In der Spiralstrahlmühle überlagern sich während des Mahlprozesses Zerkleinerungs- und Sichtungsvorgänge. Daher besteht seit der Entwicklung der Spiralstrahlmühlen großes Interesse, den Einfluss dieser Überlagerung auf die vorherrschenden Strömungsverhältnisse näher zu betrachten.

Kürten und Rumpf [36] entwickelten in den 60er Jahren das “Drei-Ebenen-Modell“, welches den Strömungsverlauf in verschiedenen Ebenen der Mühle beschreibt. Eine weitere Entwicklung in diese Richtung stellen die 2001 durchgeführten Untersuchungen von Rief [66] dar. Die Erfassung von statischen Druckwerten ist zur Überwachung des Mahlprozesses gut geeignet, da sich stabile Mahlbedingungen von instabilen Zuständen deutlich abgrenzen lassen. Eine hohe Reproduzierbarkeit der Messdaten ist bei optimaler Einstellung von Mahlspalt, Mahldruck sowie Feststoffbeladung gewährleistet.

Für die vorliegende Arbeit soll die Spiralstrahlmühle zusätzlich zum statischen Druckaufnehmer mit einer weiteren Messvorrichtung ausgestattet werden, um auftretende Strömungsgeschwindigkeiten zu ermitteln. Es bietet sich daher die Methode der Gesamtdruckmessung mittels Pitot-Rohr an, einem Verfahren, das sich seit dem 18. Jahrhundert aufgrund seiner einfachen Handhabung etabliert hat. Die lokalen Geschwindigkeiten lassen sich dann durch Differenzbildung zwischen Gesamt- und statischem Druck berechnen.

Dazu ist zunächst ein für die Spiralstrahlmühle passendes Pitot-Rohr zu konstruieren und in den Mahlkammerdeckel einzubauen. Es soll möglich sein, den Gesamtdruck reproduzierbar aufzeichnen zu können. Das Messsystem darf durch die Spiralströmung mit ihrer hohen Geschwindigkeit nicht gestört werden. Für definierte Messpunkte soll ferner die dortige Strömungsgeschwindigkeit und -richtung bestimmt werden. Von großer Bedeutung ist daher, nicht nur den statischen Druck an der Wandschicht der Mahlkammer zu messen, sondern den Gesamtdruck mittels Pitot-Rohr in inneren Bereichen der Strahlmühle. Dazu müssen verschiedene Parameter variiert werden, um den Einfluss von Eintauchtiefe und Anströmwinkel des Pitot-Rohres auf den Gesamtdruck zu untersuchen. Die Druckverläufe von jeweils statischem Druck und Gesamtdruck werden zudem auf verschiedenen Radien aufgezeichnet, um möglichst vollständig den gesamten Innenraum der Mahlkammer zu erfassen. Es soll geprüft werden, ob die Strömungsvorgänge in der eingesetzten Spiralstrahlmühle dem von Kürten und Rumpf [36] postulierten Verlauf folgen. Dazu ist die Frage zu klären, ob

dieses, mit Flüssigkeiten aufgenommene “Drei-Ebenen-Modell“ auf reine Gas- bzw. Gas-Feststoff-Strömungen übertragen werden kann.

Besonderes Augenmerk soll ferner darauf gerichtet sein, ob die Positionierung des Pitot-Rohres in Düsennähe bzw. direkt im Treibstrahl einen Einfluss auf den Gesamtdruck erkennen lässt. Dazu ist es notwendig, die Position des Rohres in Bezug zu einer Düse zu verändern. Es ist zu erwarten, dass der Gesamtdruck in Nähe einer Düse durch die hohen Ausströmgeschwindigkeiten des Treibstrahls deutlich höher ist als an düsenferneren Messpositionen.

In den Versuchsreihen soll der Druckverlauf zunächst ohne Mahlgut an verschiedenen Messpunkten aufgezeichnet werden, um Aussagen über die reine Luftströmung treffen zu können. Dazu wird das Pitot-Rohr in der Strömung derartig ausgerichtet, dass es direkt von vorn angeströmt wird, erkennbar am Auftreten eines maximalen Druckwertes. Bei Queranströmung des Rohres liegen die aufgezeichneten Werte im Bereich des statischen Drucks. Nur bei optimaler Anströmung des Rohres können vorherrschende Druckwerte genau gemessen und damit exakte Geschwindigkeiten berechnet werden.

Nachfolgend soll in einer weiteren Versuchsreihe der Einfluss des Energieeintrags in die Spiralstrahlmühle untersucht werden. Dabei ist zu zeigen, dass mit schrittweiser Erhöhung des Mahldrucks die in der Mahlkammer gemessenen Drücke und damit Geschwindigkeiten ansteigen.

Um schließlich ein Bild vom Strömungsverlauf in der Mühle zu zeichnen, sollen alle Daten zusammengefasst und ein Strömungsprofil erstellt werden.

Zuletzt ist zu prüfen, wie sich eine Pulverbeladung der Mühle auf den statischen bzw. Gesamtdruck auswirkt. Dazu muss ein geeigneter Feststoffdurchsatz ermittelt werden, bei dem die Strömungsbedingungen in der Mahlkammer stabil sind. Die Messergebnisse von Marquardt, Müller und Rief [43, 49, 66] zeigen, dass der statische Druck bei Gutzufuhr bis auf einen konstanten Wert absinkt. Die zahlreichen Pulverpartikel bremsen die zirkulierende Strömung ab mit der Folge, dass der statische Druck fällt. Dieses Druckverhalten wird ebenfalls für den Gesamtdruck erwartet unter der Voraussetzung, dass sich das Pitot-Rohr während der Messung nicht mit Pulverpartikeln zusetzt. Für diese Messreihe wird die Modellsubstanz Calciumcarbonat verwendet, die sich bereits in zahlreichen Zerkleinerungsuntersuchungen bewährt hat.

4 Material und Methode

4.1 Material

Die Untersuchungen des Strömungsverhaltens in der Spiralstrahlmühle werden zunächst im Leerbetrieb, also ohne Feststoffzugabe, durchgeführt. Für die nachfolgenden Versuche mit Pulver wird als Modellsubstanz Calciumcarbonat (Criscarb® V 130, E. Merkle GmbH, Kalk-, Terrazzo- und Steinmahlwerke, Blaubeuren) eingesetzt. Calciumcarbonat gilt aufgrund seiner physikochemischen Eigenschaften als Standardsubstanz der Zerkleinerungsforschung. Tabelle 4-1 gibt die wichtigen physikalischen Daten der verwendeten Substanz wieder, wie sie dem Datenblatt des Herstellers zu entnehmen sind [17]:

Dichte (20°C)	[g/cm³]	2,7
Stampfdichte	[g/cm³]	1,8
Härte	(Mohs)	3
x 50	[µm]	160

Tabelle 4-1: Übersicht über die physikalischen Stoffdaten der Modellsubstanz Criscarb® [17]

Eine Mohs-Härte von 3 deutet auf eine sehr harte Substanz hin. Untersuchungen des Elastizitätsmoduls liefern Werte von ca. 85 GPa, die auf sprödes Materialverhalten hinweisen [89]. Dementsprechend ist ein hoher Energieeintrag zur effektiven Zerkleinerung erforderlich [88].

Mittels Laserbeugungsanalyse erhaltenen Partikelgrößenverteilungen sollen Aufschluss darüber geben, in wieweit gleichmäßige Zerkleinerungsprodukte nach einer Mahlung in der Strahlmühle entstehen. Eine genaue Beschreibung dieser Messmethode erfolgt in Kapitel 4.2.5. Als Dispersionsmittel dient dabei vorgelegter Isopropanol, in welchem Calciumcarbonat unlöslich ist.

4.2 Methode

In diesem Kapitel wird zunächst die eingesetzte Spiralstrahlmühle beschrieben. Dabei werden die essentiellen Bauteile im Einzelnen näher erläutert. Im Anschluss erfolgt eine Darstellung der angewendeten Messtechniken zur Erfassung des statischen sowie des Gesamtdrucks. Nachfolgend wird auf die Versuchsdurchführung mit Datenauswertung sowie Berechnung der Strömungsgeschwindigkeiten eingegangen. Im letzten Abschnitt wird die Methode zur Partikelgrößenanalyse vorgestellt, die für einen Teil der Versuche verwendet wird.

4.2.1 Spiralstrahlmühle Fryma JMRS 80

Die Spiralstrahlmühle vom Typ Fryma JMRS 80 (Fryma Maschinenbau GmbH, Rheinfelden) war ursprünglich für Laboruntersuchungen im Kleinmaßstab konzipiert [12]. Rief und Marquardt bauten diese Strahlmühle bereits für ihre Versuchszwecke so um, dass für die vorliegende Arbeit keine weitere apparative Veränderung notwendig war [43, 66]. Abbildung 4-1 gibt eine schematische Darstellung der eingesetzten Versuchsanlage wieder. Mittels Dosiereinheit (1) und Injektor (2) wird das zu vermahlende Pulver in die Mahlkammer (3) transportiert. Das dort zerkleinerte Feingut kann über ein Tauchrohr (4) abgeschieden und in der Auffangeinheit (8) gesammelt werden. Ein Drucksensor (6) im Mahlkammerdeckel liefert Daten, die elektronisch gespeichert (7) werden und zur Auswertung bereitstehen. Mit Hilfe von zwei Druckminderern (5) lassen sich jeweils Mahl- und Injektorgasflüsse regeln.

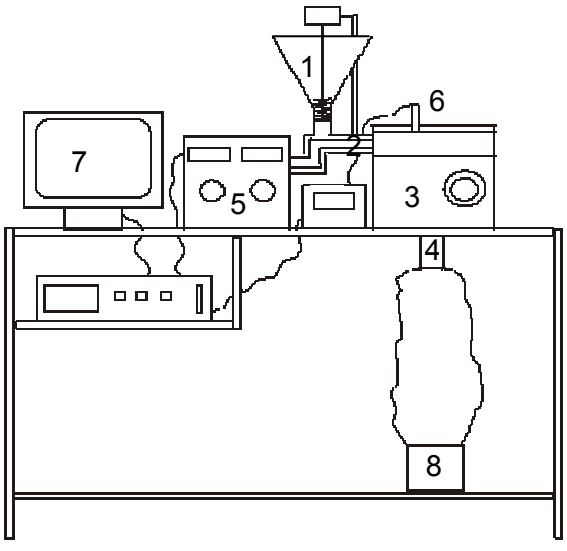


Abbildung 4-1: Schematische Darstellung der umgebauten Fryma JMRS 80
(1) Dosiereinheit (2) Injektor (3) Mahlkammer (4) Tauchrohr (5) Druckminderer und Manometer
(6) Drucksensor (7) Computer (8) Auffangeinheit

4.2.1.1 Mahlkammer mit Düsen

Die Spiralstrahlmühle besteht aus einer konischen Mahlkammer (Wölbungsradius R = 230 mm) mit einem Durchmesser von 80 mm. Auf Grund dieser Wölbung beträgt die Höhe am Rand 12 mm und in der Mitte 20 mm. Der Werkstoff der Mahlkammer ist CrNi-Stahl (1.4401), korrosionsfest und beständig gegen mechanische Einflüsse.
Abbildung 4-2 gibt eine Aufsicht der offenen Mahlkammer wieder:

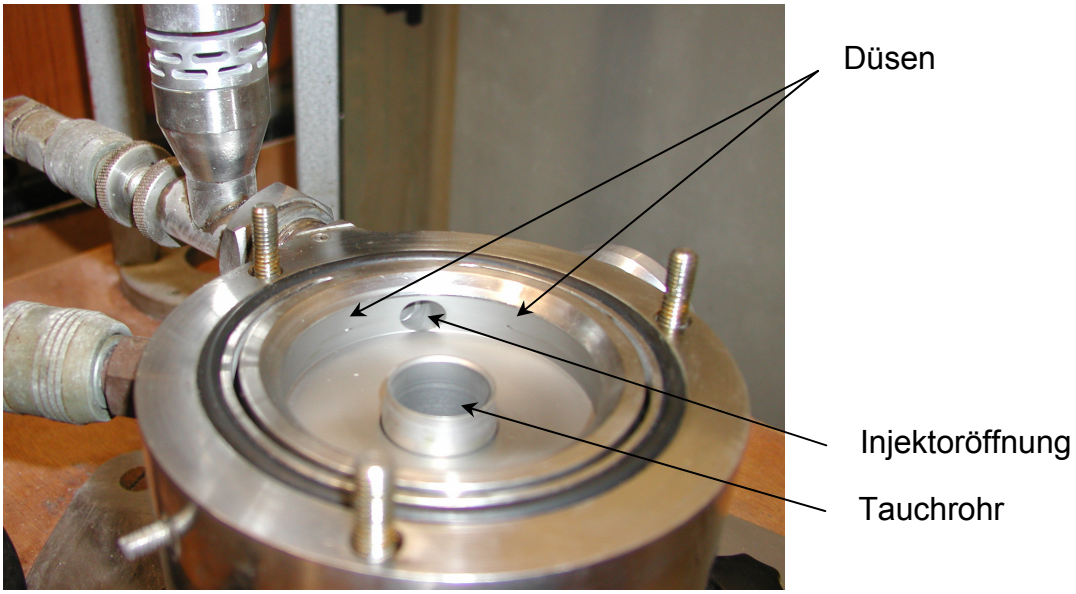


Abbildung 4-2: Aufsicht der offenen Mahlkammer

Am Umfang der Mahlkammer sind zwei von fünf Düsen (Durchmesser 0,7 mm) deutlich erkennbar, durch die das Mahlgas in die Kammer einströmt. Durch ihren Anstellwinkel von 54° zur Tangente erzwingen sie einen spiraligen Verlauf der rotierenden Strömung. Die Düsen sind im Abstand von jeweils 72° zueinander orientiert, wie Tabelle 4-2 zeigt und in allen Schemazeichnungen der Arbeit erkennbar ist.

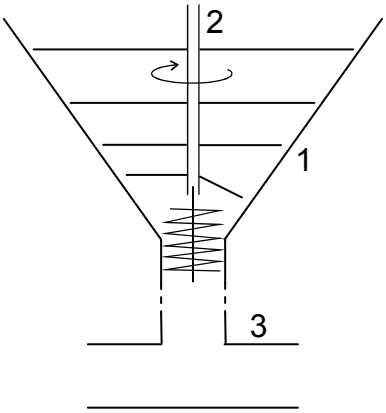
Düse	absoluter Winkel [°]
1	10
2	82
3	154
4	226
5	298
Injektor	43

Tabelle 4-2: absolute Lage der Düsen in der Mahlkammer

Als Trägermedium wird Druckluft der zentralen Institutsversorgung verwendet. Mahl- und Injektordruck lassen sich manuell über zwei Druckminderer in der Zuluftleitung (Modell 637.20 C, Slatina-Langels GmbH, Würzburg) mit einer Genauigkeit von $\pm 0{,}01 \cdot 10^5$ Pa und Kontrolle an Digital-Manometern (Typ MAN SF 26, Kobold, Hofheim) regulieren [15].

4.2.1.2 Injektor und Dosiereinheit

Die Feststoffkonzentration in der Spiralstrahlmühle übt einen wesentlichen Einfluss auf die Strömung in der Mahlkammer aus [4]. Um eine gleichmäßige Feststoffzugabe während des Mahlprozesses zu gewährleisten, bedarf es eines kontinuierlich arbeitenden Dosiersystems, vgl. Abbildung 4-3. Diese Vorrichtung besteht aus einem Edelstahltrichter (1) (Öffnungswinkel 120°) mit Rührer (2) sowie einem Injektor (3).



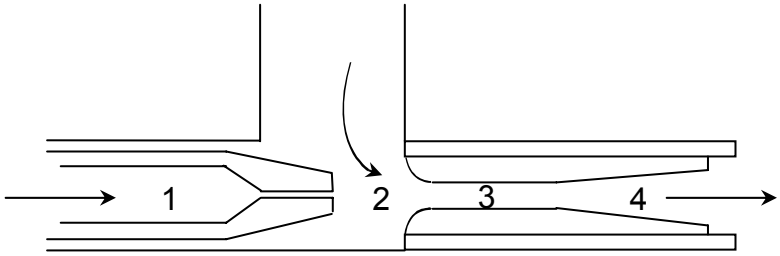


Abbildung 4-3 (links): Schematische Darstellung der Dosiereinheit
(1) Trichter (2) Stabrührer mit Querbalken und Bürste (3) Injektor

Abbildung 4-4 (rechts): Querschnitt durch den Injektor
(1) Injektordüse (2) Fangdüse (3) Mischstrecke (4) Diffusor

Mit Hilfe des Rührers und einer angepasster Förderbürste (Waffenbürste, Frankonia Jagd, Würzburg) wird das Mahlgut in die Fangdüse des Injektors transportiert. Dort wird es vom Injektorgas erfasst, beschleunigt und in die Mahlkammer eingebracht. Der Stabrührer ist mit fünf Querbalken ausgestattet und zerstört mögliche Feststoffbrücken zwischen den Pulverpartikeln, so dass alle Partikel gleichmäßig frei in den Injektor rieseln können. Der Rührer wird von einem Schrittmotor angetrieben (Hybrid-Schrittmotor 1,8°, 110 Ncm, Isel-Automation, Eiterfeld), dessen Umdrehungsgeschwindigkeit sich durch Veränderung des Schrittmodus (Halb- oder Ganzschrittbetrieb) sowie von Kondensator- und Potentiometerwiderständen einstellen lässt [14].

Auf diese Weise kann die pro Zeiteinheit in den Injektor eingebrachte Feststoffmenge variiert werden. Diese ausfließende Pulvermasse wird mit einer Waage (Mettler ME 33783, Mettler Toledo GmbH, Gießen) bestimmt.

Der Gutaufgabeinjektor gliedert sich, vgl. Abbildung 4-4, in die Bereiche Injektordüse (1), Fangdüse (2), Mischstrecke (3) und Diffusor (4) [74]. Aus der Injektordüse strömt das Mahlgas in die Fangdüse ein. Dadurch wird Pulver aus dem Trichter angesaugt und beschleunigt. Aufgrund des hier vorherrschenden Unterdrucks muss zusätzlich Luft aus der Umgebung angesaugt werden, was durch die seitlichen Luftschlitze im Trichter ermöglicht wird. Im Mischrohr mindert die Partikelbeladung die Geschwindigkeit des Luftstromes. Im nachfolgenden Bereich, dem Diffusor, erweitert sich der Querschnitt auf 8 mm, was ein weiteres Absinken der Strömungsgeschwindigkeit nach sich zieht.

Eine gewisse Geschwindigkeit der Injektorströmung muss erreicht werden, um überhaupt Pulver in die Mahlkammer einzubringen [82]. Daher sollte während des Mahlbetriebs der Druck des Injektorgases immer oberhalb des Mahlgasdrucks liegen, um ein Zurückschlagen in den Injektor zu vermeiden. Auf diese Weise lässt sich sicherstellen, dass das Gut vollständig in die Kammer eingebracht wird [52]. Eine zu hohe Einstellung des Injektordrucks führt jedoch zu einer verstärkten Ansaugung von Luft, um die auftretenden Druckunterschiede zu kompensieren. Ein weiteres Abbremsen der Strömung wäre die Folge, und die Feststoffpartikel würden nur unzureichend zerkleinert [3]. Aus diesem Grund liegt der Injektordruck in allen durchgeführten Messreihen $0{,}5 \cdot 10^5$ Pa über dem Mahlgasdruck.

4.2.1.3 Tauchrohr und Auffangeinheit

Ausreichend zerkleinerte Pulverteilchen gelangen durch die Radialkomponente der Strömung in Richtung der Sichtzone der Mahlkammer und werden über ein Edelstahl-Tauchrohr (Durchmesser 25 mm) abgeschieden, siehe Abbildung 4-2. Mit Hilfe einer Zahnstange lässt sich das Tauchrohr millimeterweise in der Höhe verstellen. Somit kann der Mahlspalt, der Spalt zwischen Mahlkammerdeckel und Tauchrohr, genau eingestellt werden.

Die Größe des Mahlspaltes hat nach Tuunilla und Marquardt Auswirkungen auf die Zerkleinerungsleistung, also auf die Feinheit des Mahlproduktes [43, 79]. Wie in Kapitel 2.4.2 erläutert, liegt über dem Tauchrohr eine Drucksenke. Aufgrund der vorherrschenden Sogkraft kommt es zu dem internen Sichtungsprozess in der Mahlkammer. Wird der Sog über dem Tauchrohr verringert, z. B. durch Einstellung eines

breiteren Mahlspaltes, kommt es zu einer längeren Verweilzeit des Pulvers in der Mahlkammer. Die Möglichkeiten für gegenseitige Zusammenstöße der Pulverpartikel steigen. Durch einen geringeren Mahlspalt wird eine höhere Sogkraft in das Abscheiderohr hinein hervorgerufen. Jedoch besteht die Gefahr, dass die Strömung nicht ungehindert abfließen kann, wenn zu wenig Fläche zur Abscheidung zur Verfügung steht.

Das zerkleinerte Pulver wird in einem Edelstahlgefäß aufgefangen, das über einen Staubsack mit dem unteren Ende des Tauchrohres verbunden ist, siehe Abbildung 4-1. In dem Gefäß wird das zur Partikelgrößenanalyse notwendige Dispersionsmittel in ausreichender Menge vorgelegt. Auf diese Weise kann ein Partikelwachstum nach der Mahlung z. B. durch Agglomeration ausgeschlossen werden.

4.2.1.4 Druckaufnehmer für den statischen Druck

Von besonderer Bedeutung für diese Arbeit ist die Instrumentierung der Spiralstrahlmühle mit einem statischen Drucksensor. Wie schon von Müller [49] beschrieben und später von Rief [66] und Marquardt [43] übernommen, dient die Aufzeichnung der statischen Druckwerte zur Inprozess-Kontrolle während des Mahlprozesses. Stabile bzw. instabile Druckzustände lassen sich unter konstanten Mahlbedingungen genau erkennen.

Für die Messungen des statischen Drucks wird ein piezoresistiver Druckaufnehmer (XT 190 M, $1{,}7 \cdot 10^5$ Pa VG, Kulite, Hofheim) verwendet.

Abbildung 4-5: Statischer Druckaufnehmers XT 190 M

Da der Sensor (Messbereich von 0 bis $6 \cdot 10^5$ Pa Überdruck) eine frontbündige Membran besitzt, wird er über eine Wandbohrung mit einem Durchmesser von 0,9 mm in den Mahlkammerdeckel integriert, vgl. Abbildung 4-6:

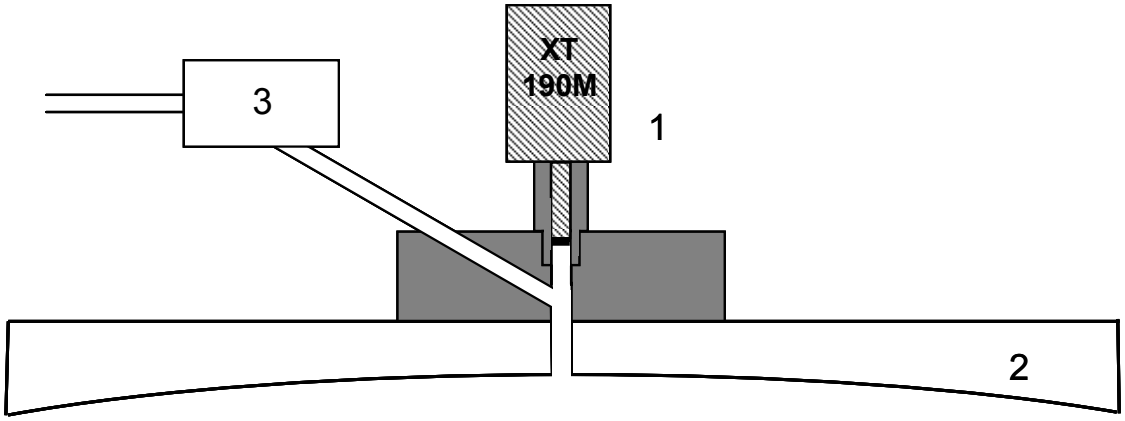


Abbildung 4-6: Schematische Darstellung des Druckaufnehmers für den statischen Druck [66]
(1) Druckaufnehmer XT 190 M (2) Mahlkammerdeckel (3) Freiblasvorrichtung

Wird der statische Druck bei Feststoffbeladung der Spiralstrahlmühle gemessen, so besteht die Möglichkeit, dass gemahlene Pulverpartikel die Membran des Drucksensors zusetzen und somit den Druckwert verfälschen. Der Druckaufnehmer wird daher zum Schutz der Membran nicht direkt auf der Bohrung platziert, sondern eine Freiblasvorrichtung zwischengeschaltet. Über ein Ventil kann alle 20 Sekunden ein kurzer Luftstoß (Vordruck $1{,}2 \cdot 10^5$ Pa) in die Bohrung geblasen werden, um diese von Pulver freizuhalten. Das automatische Freiblasventil wird über ein Programm gesteuert, dessen Quellcode Anhang 9.2 zu entnehmen ist [34]. Die Messwertaufzeichnung wird während des Freiblasvorgangs für maximal 0,5 Sekunden unterbrochen, um Schwankungen in der Druckwertanzeige zu vermeiden.
Abbildung 4-7 gibt die Bedienoberfläche des Messprogramms wieder:

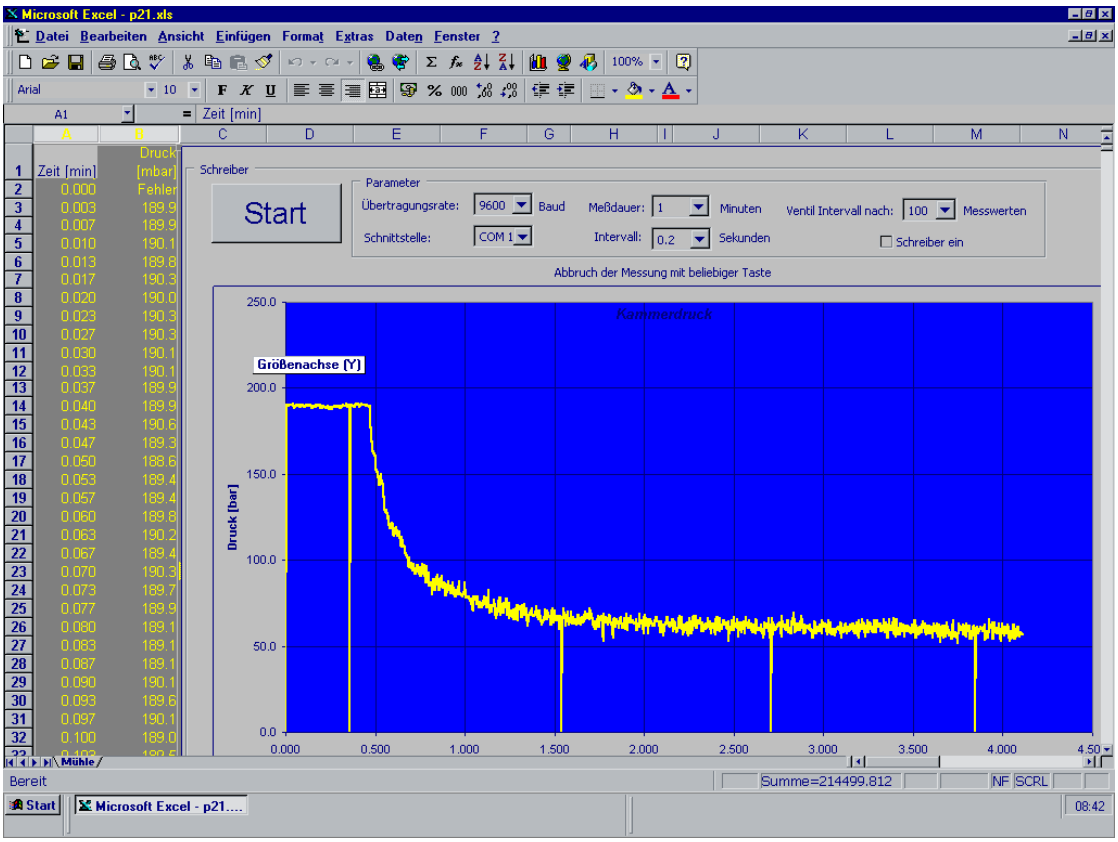


Abbildung 4-7: Bedienoberfläche des Programms zur Messung des statischen Drucks, (1 mbar = 1 hPa) [34]

Auf der linken Seite kann die Erfassung der Druckwerte pro Zeiteinheit während der Messung verfolgt werden. Im oberen Bereich des Bedienpanels lassen sich Parameter wie Messdauer oder Intervallaufzeichnung pro Sekunde variieren. Bei Beendigung der Messung erfolgen eine Auflistung der Messdaten sowie zusätzliche graphische Darstellungen.

4.2.1.5 Zusätzliche Ausstattung der Spiralstrahlmühle

Der dieser Arbeit zugrunde liegende Gedanke, das Strömungsverhalten in der Spiralstrahlmühle weiter zu untersuchen, führt zu einer intensiven Recherche nach einer geeigneten Messmethode. Aufgrund des geringen Durchmessers der Mahlkammer von nur 80 mm scheiden jedoch eine Vielzahl an gängigen Geschwindigkeitsmesstechniken aus. Für die Hitzdrahtanemometrie, ein thermoelektrisches Verfahren, sind Sonden im größeren Millimeter-Bereich erforderlich [56]. Ferner wird durch den Einbau dieser Drähte in die Mahlkammer die rotierende Strömung gestört. Optische Verfahren zur Strömungsanalyse setzen eine lichtdurchlässige Mahlkammer z. B. aus Plexiglas voraus, um Bilder aufnehmen zu können [4, 32, 38]. Jedoch ist die Gefahr einer elektrostatischen Aufladung der Oberfläche durch Pulver gegeben, so dass der

beobachtete Verlauf verfälscht wird. Daher arbeiten die heutzutage üblicherweise eingesetzten und sehr kostspieligen Verfahren mit Hilfe von Lasern, wie z. B. LDA (Laser Doppler Anemometry) und PIV (Particle Image Velocimetry) oder in Kombination mit einer Videokamera bei der HSSV (High Shutter Speed Video) [24, 44, 56, 71]. Diese Methoden sind jedoch nicht für den Mikromaßstab geeignet und erfordern ebenfalls laserdurchlässiges Material.

Als weitere Möglichkeit der Geschwindigkeitsbestimmung ergibt sich die Anwendung von Staurohren [7, 42], die in den folgenden Abschnitten genauer beschrieben wird. Zur Geschwindigkeitsberechnung ist neben der Gesamtdruckaufnahme mittels Pitot-Rohr die Kenntnis des statischen Drucks essentielle Voraussetzung. Es bietet sich daher an, diese bereits für die Spiralstrahlmühle etablierte Messmethodik aufzugreifen. Um das Pitot-Rohr und den erforderlichen Druckaufnehmer zweckentsprechend in die Spiralstrahlmühle zu integrieren, sind nur wenige apparative Veränderungen notwendig.

4.2.1.5.1 Mahlkammerdeckel

Eine weitere Bohrung bzw. Halterung für das Pitot-Rohr sowie Druckaufnehmer in den bereits vorhandenen Mahlkammerdeckel mit integrierter statischer Wandbohrung einzubauen, ist aufgrund des geringen Durchmessers von nur 80 mm nicht möglich. Daher muss für die Messung des Gesamtdrucks ein neuer Deckel mit gleichem Wölbungsradius (R = 230 mm) angefertigt werden. Die entsprechenden Konstruktionszeichnungen sind Anhang 9.1 und 9.5 zu entnehmen.

4.2.1.5.2 Pitot-Rohr

Seit über 250 Jahren werden Staurohre in Verbindung mit Druckaufnehmern zur Messung von Druck und Geschwindigkeit in strömenden Fluiden eingesetzt. Diese Technik erweist sich als einfache, direkte Messmethode mit hoher Genauigkeit [33]. Üblicherweise werden Pitot-Rohre aus Edelstahl hergestellt, da dieses Material korrosionsfrei und sehr druckbeständig ist. Abbildung 4-8 zeigt eine Aufnahme des für diese Arbeit angefertigten, dünnwandigen Edelstahlrohres:

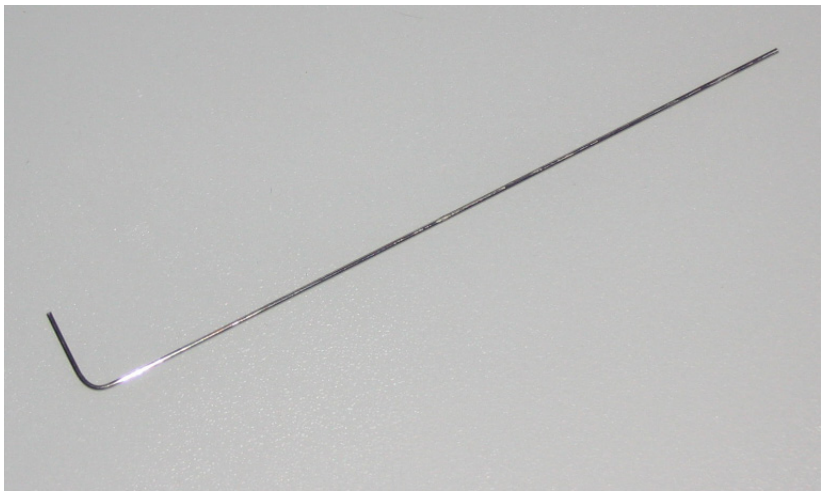


Abbildung 4-8: Pitot-Rohr aus Edelstahl

Das L-förmige Rohr wird direkt in die zu untersuchende Strömung gehalten und nimmt an seiner Spitze den in Strömungsrichtung wirkenden Gesamtdruck auf. Am anderen Ende erfolgt der Anschluss an einen Druckaufnehmer. Durch Gesamtdruckmessung in Verbindung mit einer statischen Druckmessung und anschließender Differenzbildung kann der dynamische Druck und daraus die Strömungsgeschwindigkeit berechnet werden, vgl. Kapitel 2.4.3.2. Dazu soll sich die Spitze des Pitot-Rohres genau unterhalb der Öffnung zur Messung des statischen Drucks befinden. Nur auf diese Weise können exakt die Differenz gebildet und fehlerhafte Werte vermieden werden. Abbildung 4-9 veranschaulicht den Aufbau der Messvorrichtung, wie sie häufig Anwendung findet [48, 54, 81]:

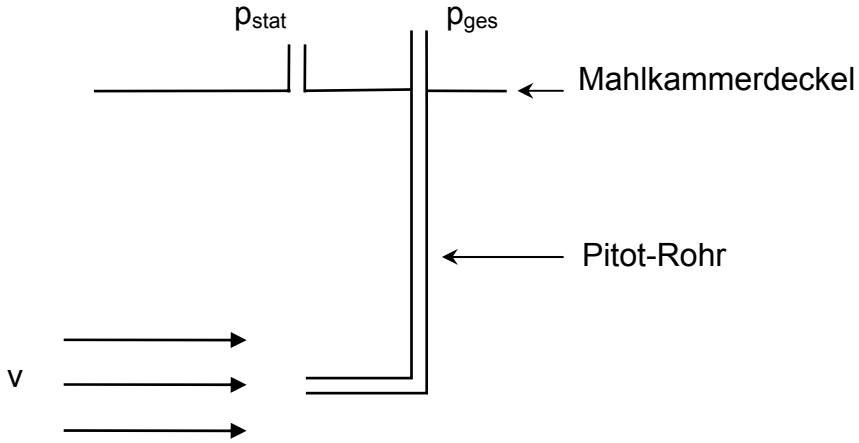


Abbildung 4-9: Aufbau der Messvorrichtung mit Pitot-Rohr

Aufgrund des geringen Durchmessers der Mahlkammer kann diese Messanordnung für die vorliegende Arbeit nicht realisiert werden. Ein zusätzlich zum statischen Drucksensor in den Mahlkammerdeckel integrierter Druckaufnehmer lässt sich auf Grund des

begrenzten Mahlkammerdurchmessers nicht einbauen. Um jedoch die bereits erfolgreich eingesetzte statische Instrumentierung der Strahlmühle zu nutzen, werden der statische sowie der Gesamtdruck separat gemessen, damit sich die beiden Druckaufnehmer nicht gegenseitig behindern und beeinflussen [56, 61].
Bei der Entwicklung eines geeigneten Pitot-Rohres müssen zudem weitere Faktoren beachtet werden [80]. Tabelle 4-3 führt elementare Störfaktoren auf, die eine fehlerbehaftete Messung begünstigen, und zeigt, wie Abhilfe geschaffen wird:

Problem	**Abhilfe**
Abmessungen des Rohres (Länge, Durchmesser) unbekannt	über ”trial and error” ermitteln
Strömungsrichtung unbekannt	über ”trial and error” ermitteln
Strömung wird durch Rohr gestört	Rohr direkt von vorn anströmen, Rohrspitze mit zusätzlichem Radius fertigen, um dem spiraligen Verlauf besser anzupassen
Pulverpartikel verstopfen Rohr	zunächst ohne Gutbeladung messen, dann Rohr mit Freiblasvorrichtung von Partikeln befreien

Tabelle 4-3 : Problematik bei der Messung des Gesamtdrucks mittels Pitot-Rohr

Wie bereits in Kapitel 2.4 erläutert, ist von einer Strömung mit Geschwindigkeiten im hohen subsonischen Bereich auszugehen. Daher besteht die Möglichkeit, dass das Rohr von der Strömung mitgerissen wird. Es muss also stabil fixiert sein, um fehlerhafte Messwerte zu vermeiden. Dazu wird das Pitot-Rohr über ein Distanzrohr mit Druckaufnehmer und Mahlkammerdeckel verbunden. Teflondichtungen schließen die Wandungen bündig ab, wie die Konstruktionszeichnungen in Anhang 9.5.2 und 9.5.3 zeigen. Damit sich das Rohr der spiraligen Strömung besser anpassen kann und keine zusätzlichen Störungen verursacht, soll die Spitze leicht gebogen sein.
Die Messungen erfolgen zunächst mit unbeladener Strömung, um in den ersten Versuchsreihen Gesamtdruckwerte der reinen Gasströmung aufzunehmen. Für die anschließenden Untersuchungen mit Mahlgut wird eine Freiblasvorrichtung, vgl. Abbildung 4-6, verwendet, die mittels kurzen Luftstoßes das Pitot-Rohr von Partikeln befreit. Es ist davon auszugehen, dass durch die direkte Anströmung Pulverteilchen das Rohr zusetzen.
Ein großes Problem stellen ferner die Abmessungen des Pitot-Rohres dar, da in der Literatur kein einheitliches Design von Staurohren angegeben ist. Es finden sich zahlreiche Konstruktionshinweise, die allerdings erheblich voneinander abweichen

[9, 20, 25, 27 46, 57, 84]. Besonders wichtig ist das Verhältnis von Innendurchmesser (d) zu Außendurchmesser (D), welches je nach Autor von 0,5 bis 0,9 angegeben wird. Zudem soll die Kopflänge das 10- bis 20 fache des Innendurchmessers betragen. Die tatsächlichen Abmessungen sind daher mittels ”trial and error” dem jeweiligen System und Strömungsfeld anzupassen, was einen hohen Zeit- und Materialbedarf in Anspruch nimmt. Der geringe Durchmesser der Mahlkammer von 80 mm engt die Auswahl möglicher Pitot-Rohre zusätzlich ein. Erfahrungswerte aus früheren Untersuchungen dienen daher der vorliegenden Arbeit nur zur Orientierung [56, 81]. Da die handelsüblichen Pitot-Rohre sehr teuer und meist zu groß für die eingesetzte Spiralstrahlmühle sind, werden für die Selbstanfertigung Edelstahlrohre (1.4301) der Firma Helwig GmbH, Berlin, mit einem Innendurchmesser von 0,8 mm und einer Wandstärke von 0,15 mm verwendet. Zu Vergleichszwecken werden Rohre aus Edelstahlkanülen (SUS 304) der Firma Ehrhardt, Geislingen, mit einem Innendurchmesser von 1,0 mm und einer Wandstärke von 0,2 mm angefertigt. Da die Gesamtlänge keinen Einfluss auf das Messergebnis nimmt, wird eine Länge von 100 mm gewählt, um die Rohre in den Versuchen bis zum Boden der Mahlkammer ausrichten zu können.

Es muss herausgefunden werden, welches angefertigte Pitot-Rohr zur Messung des Gesamtdrucks geeignet ist. Dabei ist eine exakte Positionierung in der Strömung von essentieller Bedeutung [33]. Bereits kleinste Abweichungen vom direkten Anströmwinkel können sich in einem Messfehler bemerkbar machen. Abbildung 4-10 stellt den prozentualen Messfehler des Gesamtdrucks in Abhängigkeit der Durchmesser-Verhältnisse dar. Je größer das Durchmesserverhältnis, desto geringer ist der Messfehler, wenn sich die Rohrspitze nicht direkt der Strömung entgegenrichtet.

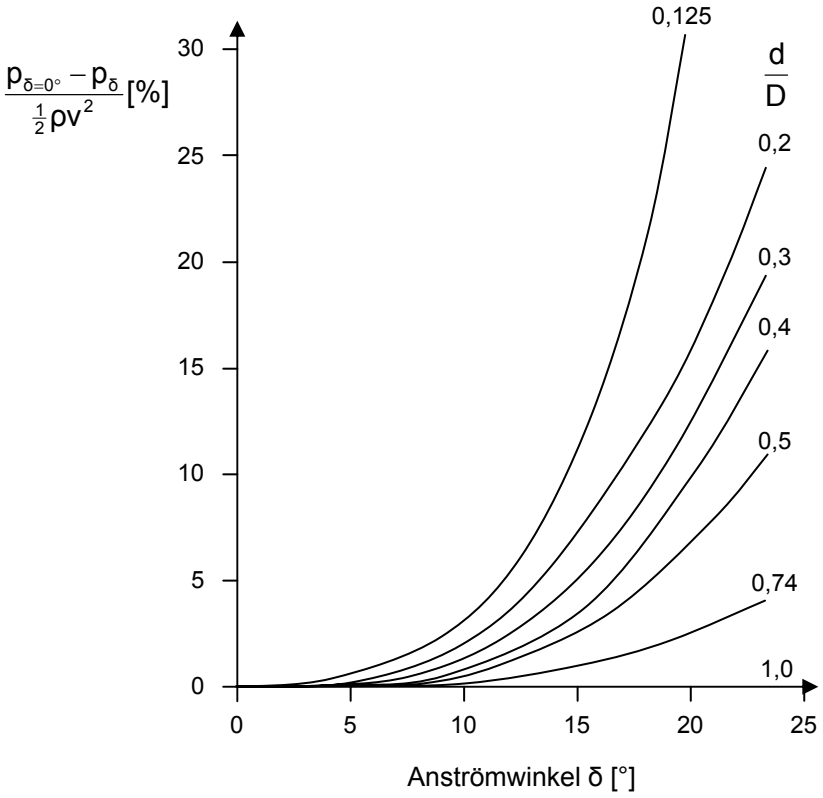


Abbildung 4-10: Winkelcharakteristik von Pitot-Rohren [58]

Die Abbildung zeigt Ergebnisse, die aus Messungen mit Pitot-Rohren, angefertigt aus Edelstahlkanülen, gewonnen wurden. Wird die Sondenspitze abgerundet, konisch abgeflacht oder sogar in der Wandstärke verringert, kann die Winkelabhängigkeit weiter verbessert werden [25, 46]. Gesamtdrucksonden mit derartigen Spitzen stehen aufgrund der geringen Wandstärke des Werkstoffs für diese Arbeit nicht zur Verfügung, so dass mit einfachen zylindrischen Edelstahlrohren gearbeitet wird.

4.2.1.5.3 Druckaufnehmer für den Gesamtdruck

Der in Kapitel 4.2.1.4 vorgestellte Druckaufnehmer XT 190 M kann prinzipiell ebenfalls zur Aufnahme des Gesamtdrucks eingesetzt werden. Aufgrund der frontbündigen Membran ist jedoch keine Möglichkeit für einen direkten Anschluss an das Pitot-Rohr gegeben. Daher muss ein neuer Druckaufnehmer ausgewählt werden, für den bestimmte Anforderungen gelten.

Dieser Drucksensor soll einen ausreichenden Messbereich aufweisen, um die erwarteten hohen Drücke, resultierend aus den hohen Geschwindigkeiten in der Spiralstrahlmühle, aufzunehmen. Außerdem soll der Messfehler des Druckaufnehmers so gering wie möglich sein. Zudem ist eine serielle Schnittstelle für Datenaufzeichnung

und Auswertung mittels Computer erforderlich. Das neue Druckmessgerät soll mit einem Computer verbunden werden, um Messdaten zu speichern und nicht nur Momentanwerte aufzuzeichnen. Für den Anschluss des Sensors ist wichtig, dass er möglichst direkt mit dem Pitot-Rohr verbunden werden kann und in den Mahlkammerdeckel integrierbar ist. Die Entscheidung für den Druckaufnehmer D 10 der Firma WIKA, Klingenberg, erfolgt aufgrund einer Reihe von Eigenschaften, die nachfolgend dargelegt werden.

Abbildung 4-11: Druckaufnehmer D 10 (rechts) mit Stecker (links)

Das Foto in Abbildung 4-11 zeigt den Druckaufnehmer D 10 aus CrNi-Stahl. Deutlich erkennbar ist der Druckanschluss, der nicht über eine frontbündige Membran erfolgt, sondern mittels Druckkanal und Gewinde (1/8 B) an der Unterseite des Transmitters. Der Messbereich für den Druck liegt mit 0 bis $6 \cdot 10^5$ Pa Überdruck im gleichen Bereich wie der Drucksensor der Firma Kulite. Der Messfehler wird mit 0,1% vom Endwert angegeben und ist mit 6 hPa deutlich niedriger als bei Geräten anderer Hersteller. Über den 9-poligen Stecker erfolgt ein direkter, serieller Anschluss an den Computer, so dass die Messdaten schnell erfasst und mittels geeigneter Software (EasyCom®, WIKA, Klingenberg) ausgewertet werden können. Zudem ist ein Pt 100-Fühler für eine zeitgleiche Temperaturmessung integriert [19]. Abbildung 4-12 zeigt die Bedienoberfläche des Messprogramms EasyCom®:

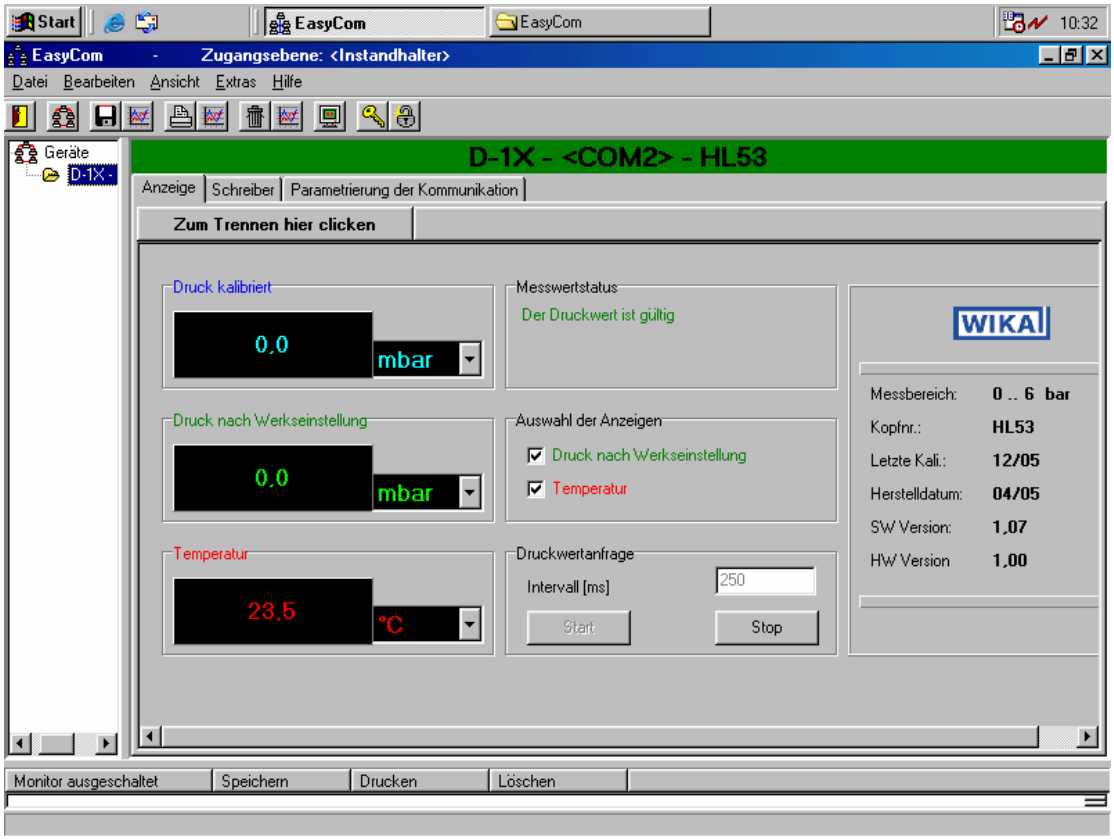


Abbildung 4-12: Benutzeroberfläche des Messprogramms EasyCom®, Startseite, (1 mbar = 1 hPa)

Die Messung erfolgt in der Zugangsebene „Instandhalter“ [18]. In dieser Ebene können alle wichtigen technischen Daten des Transmitters sowie Druck- und Temperaturwerte direkt abgelesen werden. Abbildung 4-13 gibt die Benutzeroberfläche während einer laufenden Messung an, bei der die aktuellen Druck- und Temperaturwerte angezeigt und ausgewählt werden können:

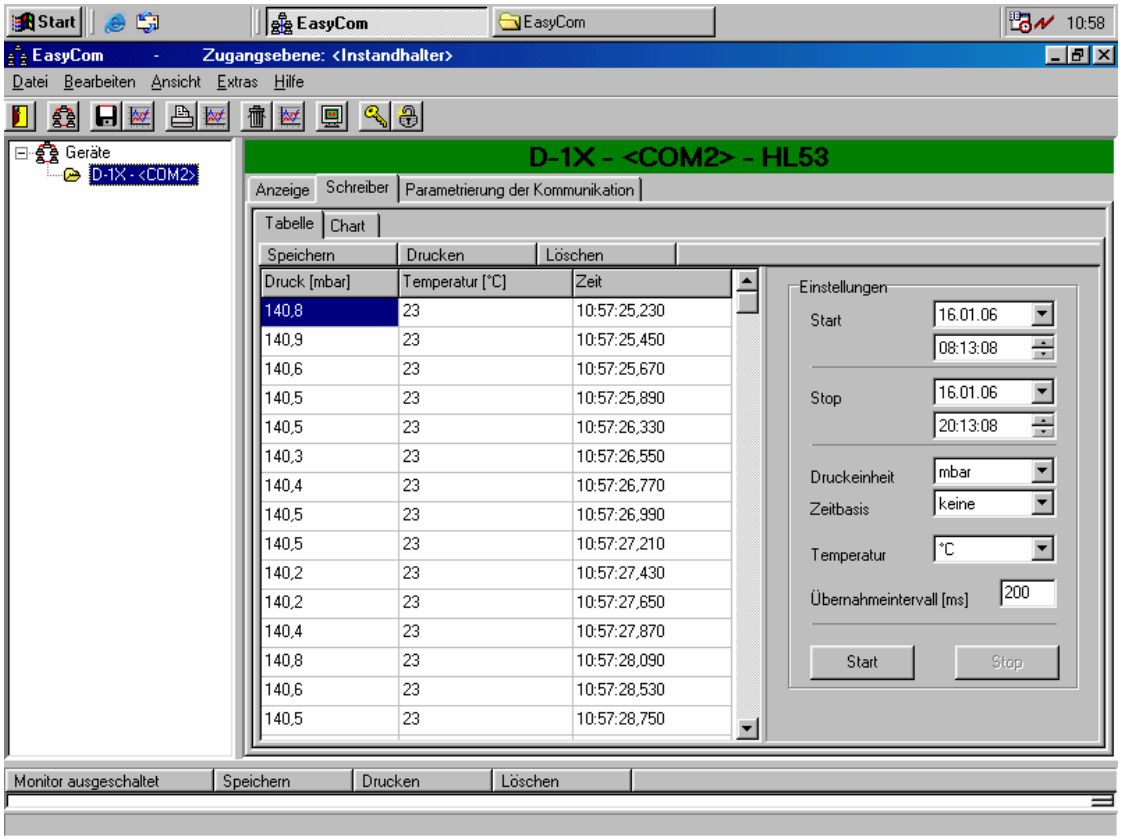


Abbildung 4-13: Benutzeroberfläche des Messprogramms EasyCom® während einer Messung, (1 mbar = 1 hPa)

4.2.2 Versuchsplanung und Durchführung

Die Strömungszustände in der Spiralstrahlmühle während eines Mahlprozesses resultieren aus dem Zusammenspiel von geometrischen sowie operativen Parametern. Zu den geometrischen Parametern zählen Durchmesser von Mahlkammer, Tauchrohr und Düsen sowie Höhe der Mahlkammer und Düsenanzahl. Die operativen oder Betriebsparameter wie z. B. Mahl- und Injektordruck, Mahlspalt sowie zugeführte Pulvermenge pro Zeiteinheit lassen sich zu Untersuchungszwecken innerhalb gewisser Grenzen variieren [5, 47, 79, 88]. An Hand der aufgezeichneten Druckwerte lassen sich dann Aussagen über die Stabilität der Strömung treffen.

Für die Versuche in dieser Arbeit soll an der Geometrie der Mühle keine weitere Veränderung vorgenommen und die operativen Parameter durchgängig auf einer mittleren Einstellung (Mahldruck $4{,}0 \cdot 10^5$ Pa, Injektordruck $4{,}5 \cdot 10^5$ Pa, Mahlspalt 5 mm) gehalten werden. Nur auf diese Weise sind extrem hohe Drücke und damit auch hohe Geschwindigkeiten bewusst zu vermeiden. Das Pitot-Rohr würde sonst von der Strömung mitgerissen. Der Injektordruck wird $0{,}5 \cdot 10^5$ Pa höher als der Druck des Mahlgases gewählt, um auch im Leerbetrieb der Mühle ein Zurückschlagen des einströmenden Injektorgases zu verhindern.

Für die Versuchsreihen soll in einem ersten Schritt die reine Luftströmung untersucht werden, weshalb auf Feststoffbeladung verzichtet wird. Dazu wird das notwendige Mahlgas aus der Druckluftleitung (Vordruck $6 \cdot 10^5$ Pa) gespeist und mittels Druckminderer konstant gehalten. Ein Vorlauf von 30 Sekunden bei jeder Messung soll sicherstellen, dass sich stabile Druckverhältnisse in der Mühle aufbauen und Schwankungen vermieden werden. Alle Versuche werden fünffach über eine Messdauer von fünf Minuten durchgeführt und jeweils der Mittelwert zur weiteren Auswertung herangezogen. Die Messwerterfassung erfolgt dabei in einem Intervall von 0,2 Sekunden.

4.2.2.1 Messung des statischen Drucks

Die Aufzeichnung des statischen Drucks während des Mahlprozesses hat sich als Kontrollmodul stabiler Arbeitsbedingungen etabliert [4, 43, 49]. Daher werden die ersten Versuchsreihen für den Leerbetrieb mit der Messung des statischen Drucks begonnen. Entsprechend den Ergebnissen von Rief [66] eignet sich der Radius 35,5 mm gut zur Überwachung der Druckverhältnisse. Jedoch muss auch untersucht werden, ob die Nähe zu einer Treibstrahldüse einen Einfluss auf die Druckwerte ausübt [10, 63]. Dieser Aspekt blieb bei vorangehenden Arbeiten fast immer unberücksichtigt. Daher soll zunächst durch Drehen des Mahlkammerdeckels um jeweils 30° im Uhrzeigersinn der Druck auf dem äußeren Radius an zwölf verschiedenen Positionen erfasst werden. Der Winkel 0° wird willkürlich festgelegt. Zum besseren Verständnis veranschaulicht Tabelle 4-4 die Lage der Positionen in Abhängigkeit vom absoluten Winkel in der Spiralstrahlmühle:

Position	absoluter Winkel [°]
1	15
2	45
3	75
4	105
5	135
6	165
7	195
8	225
9	255
10	285
11	315
12	345

Tabelle 4-4: Übersicht über die zwölf Positionen für die Messung des statischen Drucks

Nachfolgend wird der statische Druck an weiteren Messpunkten, die über den Mahlkammerradius verteilt liegen, aufgezeichnet, um Druckkennlinien in Abhängigkeit vom Radius zu erstellen, vgl. Tabelle 4-5. Die Bohrungen für den Druckaufnehmer sind über dem Radius von 40 mm derartig angebracht, dass jeweils vier außerhalb bzw. innerhalb des Tauchrohres (Radius 12,5 mm) liegen [66].

Bohrung Nr.	Radius [mm]
1	35,5
2	26,5
3	17,0
4	13,0
5	11,0
6	9,0
7	4,0
8	0,0

Tabelle 4-5: Lage der Bohrungen für den Druckaufnehmer auf den einzelnen Radien

Es ist davon auszugehen, dass sich die Spitze des Pitot-Rohres auf einem bestimmten Radius nicht immer unterhalb der Bohrung für die Messung des statischen Drucks befindet. Für die spätere Berechnung des dynamischen Drucks ist es daher notwendig, den Wert des statischen Drucks für jeden Radius in der Mahlkammer zu interpolieren. Die entsprechenden Funktionsgleichungen werden mit Hilfe der gemessenen radialen Druckwerte aufgestellt.

In einer weiteren Versuchsreihe soll der Einfluss von erhöhter Mahlenergie auf die statischen Druckwerte genauer untersucht werden. Dazu wird der Mahldruck schrittweise um $0{,}5 \cdot 10^5$ Pa gesteigert und der statische Druck jeweils an einer Position auf dem Radius 35,5 mm aufgezeichnet.

Anschließend soll der statische Druck bei Gutzufuhr gemessen werden. Dazu ist zunächst eine Bestimmung der in die Strahlmühle eingebrachten Feststoffmenge pro Zeiteinheit, der Förderrate, notwendig, so dass keine hohen Schwankungen der Druckwerte auftreten. Eine Überladung der Mühle mit Pulver ist zu vermeiden, um über eine Messdauer von 10 Minuten stabile Mahlbedingungen zu erzielen. Jede Messung wird dreifach durchgeführt und der Mittelwert zur weiteren Auswertung herangezogen.

4.2.2.2 Messung des Gesamtdrucks

Zunächst soll ein Vergleich der Messwerte der Druckaufnehmer ermitteln, welcher der beiden Sensoren für die Messungen des Gesamtdrucks verwendet wird. In nachfolgenden Versuchen werden verschiedene Pitot-Rohre geprüft, ob sie zur Erfassung des Gesamtdrucks in der Spiralstrahlmühle geeignet sind. Das Rohr, welches die höchsten Gesamtdruckwerte liefert, wird dann auf einem Radius von 35,5 mm über ein Distanzrohr, siehe Anhang 9.5.2 und 9.5.3, in den Mahlkammerdeckel eingebaut. Durch Drehen des Deckels um 30° im Uhrzeigersinn kann der Gesamtdruck an zwölf Positionen bestimmt werden. Zusätzlich wird das Rohr an dieser Position um jeweils 10° durch die Strömung gedreht, um über einen Bereich von 0° bis 360° einen maximalen Druckwert zu ermitteln, vgl. Abbildung 4-14:

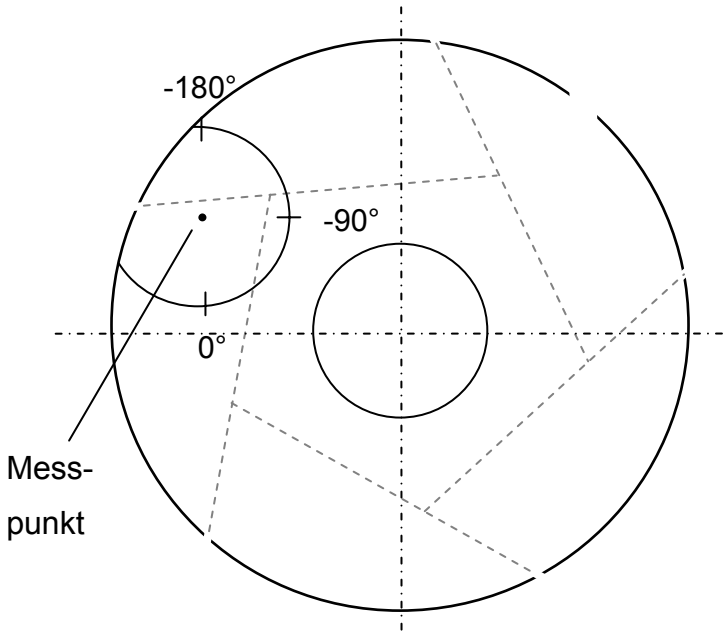


Abbildung 4-14: Übersicht über die Variation des Anströmwinkels von 0° bis 360°, beispielhaft dargestellt für einen Messpunkt auf dem Radius 35,5 mm

Die Ausrichtung des Pitot-Rohres erfolgt an einem Messpunkt jedes Mal anders in Bezug zu einer Düse. Ein Druckmaximum zeigt an, dass das Rohr direkt von vorn, also optimal angeströmt wird. Nur in diesem Fall lässt sich die Richtung der Strömung bestimmen und die lokale Geschwindigkeit mit Hilfe des Gesamtdrucks berechnen. Daher wird im Bereich des maximalen Druckwertes auf ± 5° genau gemessen. Die Versuche werden mit verschiedenen Eintauchtiefen des Pitot-Rohres in die Mahlkammer durchgeführt. Durch die konische Form der Mahlkammer sind Messbereiche von 3 mm bis 15 mm möglich. Zuletzt werden die Messungen auf die

anderen Radien, vgl. Tabelle 4-2, ausgedehnt, um den Innenraum der Mahlkammer so vollständig wie möglich zu erfassen. Abbildung 4-15 gibt eine Übersicht stellt die Lage der Messpunkte für den Gesamtdruck dar, an denen das Pitot-Rohr in den Mahlkammerdeckel eingebaut wird:

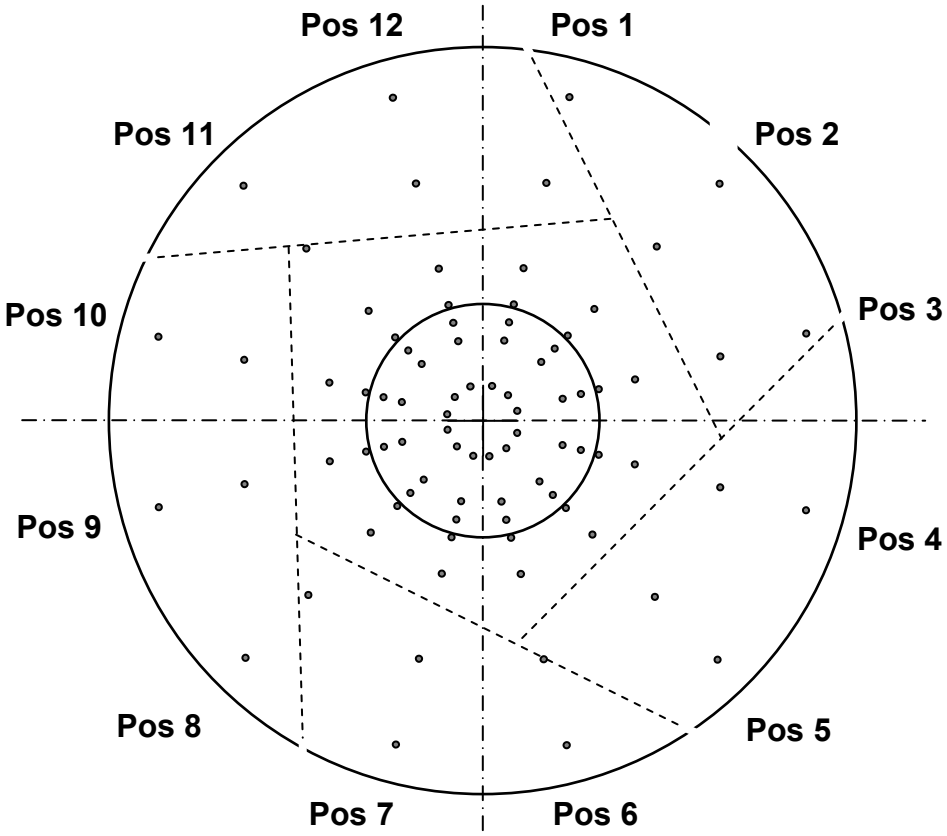


Abbildung 4-15: Lage der Messpunkte, an denen das Pitot-Rohr in den Mahlkammerdeckel eingebaut wird

Tabelle 4-6 gibt eine Übersicht über die bei jeder Messung systematisch variierten Parameter. Die Eintauchtiefe des Pitot-Rohres wird jeweils ausgehend vom Mahlkammerdeckel gemessen. Da ein spiraliger Verlauf der Grundströmung zu erwarten ist, wird das Pitot-Rohr entgegen dem Uhrzeigersinn durch die Strömung gedreht.

Position [-]	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12
Anströmwinkel [°]	0, -10, -20, -30, -40, -50, -60, -70, -80, -90, -100, -110, -120, -130, -140, -150, -160, -170, -180, -190, -200, -210, -220, -230, -240, -250, -260, -270, -280, -290, -300, -310, -320,-330, -340, -350, -360
Eintauchtiefe [mm]	3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15
Radius [mm]	0,0; 4,0; 9,0; 11,0; 13,0; 17,0; 26,5; 35,5

Tabelle 4-6: untersuchte Parameter in den Versuchsreihen

In weiteren Messungen soll der Einfluss von erhöhtem Mahldruck auf den Gesamtdruck und somit die Geschwindigkeit in der Mahlkammer quantifiziert werden.
In einer abschließenden Versuchsreihe erfolgt die Gesamtdruckmessung mit Feststoffbeladung an der Position, an der zuvor im Leerbetrieb maximale Druckwerte aufgezeichnet wurden. Zunächst gilt es jedoch sicherzustellen, dass sich das Pitot-Rohr nicht mit Pulver zusetzt und hohe Druckschwankungen auftreten. In diesem Fall ist eine Berechnung der Geschwindigkeit nicht möglich.

4.2.3 Auswertung der aufgenommenen Druckwerte und Berechnung der Strömungsgeschwindigkeit

Abbildung 4-15 zeigt die Messpunkte, an denen sowohl der Druckaufnehmer für den statischen Druck als auch das Pitot-Rohr mit Druckaufnehmer für den Gesamtdruck in den Mahlkammerdeckel eingebaut werden. Da die Kopflänge des Rohres 13 mm beträgt und an jeder Position um einen Winkel von 360° gedreht wird, befindet sich der tatsächliche Messpunkt, an dem das Rohr optimal angeströmt wird, nicht mehr auf dem selben Radius, sondern an einer anderen Position, vgl. Abbildung 4-14. Daher wird der fehlende statische Druck mit Hilfe von Funktionsgleichungen interpoliert.
Zur Auswertung der Gesamtdruckmessungen wird jeweils der Mittelwert aus den einzelnen Versuchen herangezogen und auf ganze Zahlen gerundet. Die Rohdaten zu den einzelnen Messungen sind, nach Radius und Eintauchtiefe geordnet, Anhang 9.8 zu entnehmen.
Die Berechnung der Strömungsgeschwindigkeit erfolgt mit Hilfe der Gleichungen 2.9 und 2.18. Bei Kenntnis der Temperatur und des statischen Druckwertes lässt sich auf diese Weise die lokale Geschwindigkeit ermitteln. Eine Beispielrechnung ist in Kapitel 5.3.4 aufgeführt. Die erhaltenen Werte werden dann graphisch mit Hilfe des Visualisierungsprogramms MATLAB® [45] dargestellt, um deutlich Richtung und Geschwindigkeit der Strömung in verschiedenen Bereichen, unter besonderer Berücksichtigung der Geometrie der Mühle, aufzuzeigen.
Bei den Untersuchungen mit Gutzufuhr werden die Druckwerte zwischen 3,5 und 10 Minuten gemittelt, um sicherzustellen, dass der stationäre Betriebszustand der Strahlmühle erreicht ist [23, 73].

4.2.4 Fehlerbetrachtung

Während der zahlreichen Versuchsreihen zur Druckerfassung sind konstante äußere Bedingungen über einen langen Zeitraum nicht gegeben. Daher ist von Schwankungen der Raumtemperatur, relativer Feuchte sowie des Luftdrucks auszugehen. Um starke Abweichungen in den aufgezeichneten Druckwerten zu vermeiden, wird vor Beginn einer Messung ein Nullabgleich des jeweiligen Druckaufnehmers durchgeführt, um jeweils nur den Überdruck zum Atmosphärenluftdruck aufzuzeichnen. Mit einem Labor-Hygrometer werden Raumtemperatur und relative Feuchte bestimmt. Der aktuelle äußere Luftdruck wird täglich von der Wetterstation Würzburg abgerufen und ist den Rohdaten in Anhang 9.8 beigefügt. Für die Messungen des Gesamtdrucks wird angestrebt, das Pitot-Rohr so exakt wie möglich in der Strömung zu orientieren, um den optimalen Anströmwinkel bei einer bestimmten Eintauchtiefe zu erfassen. Daher erfolgt die Ausrichtung in 10°-Schritten um den jeweiligen Messpunkt. Eine schlechte Anströmung mit resultierenden, verminderten Druckwerten soll auf diese Weise vermieden werden. Im Bereich des maximalen Druckwerts wird zusätzlich um ± 5° gemessen, um eine genaue Messwerterfassung sicherzustellen.
Die einzelnen Messergebnisse für den Gesamtdruck werden, wie bereits angegeben, gemittelt und für die Berechnung der Geschwindigkeiten auf ganze Zahlwerte gerundet. Eine Angabe dieser Druckwerte mit Dezimalstellen ist nicht sinnvoll, da das Pitot-Rohr keine derartig hohe Empfindlichkeit aufweist. Zudem dürfen auch die Messungenauigkeiten der Druckaufnehmer nicht unberücksichtigt bleiben. Um den maximalen Fehler der Geschwindigkeit näher zu quantifizieren, erfolgt in Kapitel 5.3.7 eine Beispielrechnung.

4.2.5 Partikelgrößenanalyse

Die Korngrößenanalyse der Modellsubstanz Criscarb® wird offline mit Hilfe eines Coulter® Counters LS 230 (Coulter Electronics GmbH, Krefeld) im Small Volume Module durchgeführt. Diese Messmethode beruht auf dem Prinzip der Laserbeugung an kleinsten Partikeln in einem Messbereich von 0,04 µm bis 2000 µm.
Abbildung 4-16 zeigt die Messanordnung des Coulter® Counters:

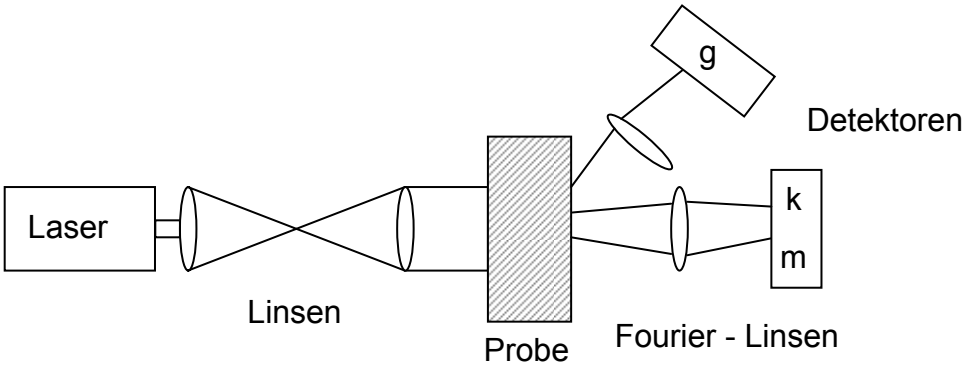


Abbildung 4-16: Schematische Darstellung der Messanordnung des Coulter® Counters [11]

Ein Laserstrahl mit einer Wellenlänge von 750 nm wird durch optische Linsen aufgeweitet und trifft auf die partikelbeladene Probe. In Abhängigkeit von verschiedenen Partikelgrößen wird nun das Laserlicht gebeugt und durch Fourier-Linsen auf zahlreichen Fotodetektoren abgebildet. Es entstehen Beugungsmuster mit unterschiedlicher Intensität, resultierend aus den verschiedenen Ablenkwinkeln. Unabhängig von Position und Geschwindigkeit des Teilchens in der Probe, sondern nur bezogen auf die Partikelgröße, kann jeweils für große (g), mittlere (m) und kleine (k) Winkel ein Beugungsbild erfasst werden. Für den Teilchengrößenbereich von 0,04 µm bis 0,4 µm ist durch Berücksichtigung der PIDS-Anordnung (Polarisation Intensity Differential Scattering) eine exaktere Bestimmung des Feinanteils möglich. Die graphische sowie rechnerische Auswertung erfolgt mittels zugehöriger Software (Version 2.11, 03/1997).

Das in der Spiralstrahlmühle zerkleinerte Pulver wird in Isopropanol dispergiert und 10 Minuten im Ultraschallbad entgast. So wird eine Verfälschung der Messung durch Luftblasen vermieden, da diese irrtümlich als Teilchen miterfasst werden könnten. Zu Beginn einer Messung ist daher automatisch das Entfernen von störenden Luftblasen vorgesehen, bevor ein Nullabgleich durchgeführt wird [11]. Erst dann ist die suspendierte Probe mit Hilfe einer Pipette als dünner Flüssigkeitsfilm der Messzelle zuzuführen.

Zur Überprüfung eines erfolgreichen Zerkleinerungsvorgangs erfolgt eine fünffache Analyse der Partikelgrößen. Der Mittelwert des Medians wird zur weiteren Auswertung herangezogen.

4.2.6 RRSB-Verteilung

Zur genauen Beschreibung der Korngrößenverteilung von Zerkleinerungsprodukten findet häufig die RRSB-Verteilung Anwendung [43, 86]. Die bei der Partikelgrößenanalyse aufgezeichnete Summenverteilung lässt sich näherungsweise nach Rosin, Rammler, Sperling und Benett durch folgende Funktionsgleichung angeben:

$$D(d) = 1 - e^{-\left(\frac{d}{d'}\right)^n} \qquad (4.1)$$

D Durchgangssumme [-]
d Partikeldurchmesser [m]
d' charakteristische Korngröße [m]
n Gleichmäßigkeitskoeffizient [-]

An Hand der beiden charakteristischen Parameter d' und n kann die erhaltene Partikelgrößenverteilung approximiert werden. Durch doppeltes Logarithmieren wird die Funktion 4.1 in eine Gerade umgeformt. Unter Verwendung eines RRSB-Netzes [8] lässt sich dann der Gleichmäßigkeitskoeffizient n der Steigung der Geraden entnehmen. Daher wird die Gleichmäßigkeitszahl auch als Streuungsparameter bezeichnet, da sie die Breite einer Verteilung angibt. Je größer dieser Parameter, desto enger verteilt ist das untersuchte Zerkleinerungsprodukt. Mit Hilfe des RRSB-Körnungsnetzes wird weiterhin die charakteristische Korngröße d' direkt bei einem Durchgang von 63,20 % bestimmt. Dieser Lageparameter beschreibt die Feinheit des erhaltenen Mahlproduktes.
Durch Nutzung der Software PMPcompact® (Version 3.1) [13] der Firma Grainsoft, Freiberg, lassen sich die mittels Coulter Counter® zuvor aufgenommenen Summenverteilungen in RRSB-Verteilungen umwandeln. Die aus fünf Messungen bestimmten Lageparameter und Gleichmäßigkeitskoeffizienten werden gemittelt und dienen dem weiteren Vergleich.

5 Ergebnisse und Diskussion

5.1 Messungen des statischen Drucks

Die Aufzeichnung des statischen Drucks dient zur Überwachung stabiler Betriebsbedingungen in der Mühle. Unregelmäßigkeiten im Strömungsverlauf lassen sich an Hand dieser Druckverläufe genau erfassen. Zahlreiche Untersuchungen wurden bereits durchgeführt, um u. a. den Einfluss von verändertem Mahldruck, Mahlspalt sowie Radius auf die statischen Druckverhältnisse bei Beladung der Mühle mit Pulver zu beobachten. Versuche zu variierter Position des Druckaufnehmers bei konstantem Radius blieben bislang jedoch aus. Für eine genaue Untersuchung dieses Effektes sind zunächst Betrachtungen der unbeladenen Strahlmühle von Bedeutung, um an Hand von statischen Druckmessungen weitere Aussagen über die Strömungsvorgänge treffen zu können. Dazu wird der Mahldruck in jeder Messung auf $4{,}0 \cdot 10^5$ Pa eingestellt, der Injektordruck dementsprechend auf $4{,}5 \cdot 10^5$ Pa. Eine höhere Einstellung des Vordrucks ist nicht sinnvoll, damit in späteren Versuchen das Pitot-Rohr nicht überlastet und Druckschwankungen vermieden werden. Die Höhe des Mahlspaltes beträgt 5 mm. Alle angegebenen Druckwerte werden in hPa über Umgebungsdruck angegeben.

5.1.1 Vergleich der Druckaufnehmer

Um den von Rief und Marquardt [43, 66] genutzten Druckaufnehmer XT 190 M, Firma Kulite, und den Druckaufnehmer D 10, Firma WIKA, zur Messung des statischen Drucks zu vergleichen, werden diese nacheinander in dieselbe Bohrung des Mahlkammerdeckels auf dem Radius 35,5 mm eingebaut. Die Messdauer wird bei beiden Sensoren von 5 Sekunden bis 15 Minuten variiert und der statische Druck aufgezeichnet. Es ist zu erwarten, dass eine unterschiedliche Messdauer im Leerbetrieb der Mühle keinen Einfluss auf die statischen Druckwerte nimmt.

Tabelle 5-1 gibt die Mittelwerte und Abweichungen der aufgenommenen Druckwerte in Abhängigkeit von der Messdauer an:

	Zeit [sec]	5	10	15	20	30	60	120	180	300	500	900
Druck-aufnehmer XT 190 M	**MW [hPa]**	328,1	327,9	328,3	328,0	327,9	327,8	327,9	327,4	327,9	327,8	327,4
	SDV [hPa]	0,45	0,48	0,65	0,58	0,59	0,54	0,44	0,56	0,49	0,57	0,58
Druck-aufnehmer D 10	**MW [hPa]**	313,0	312,9	313,1	313,2	313,1	313,8	313,1	313,7	313,6	313,5	313,5
	SDV [hPa]	0,25	0,29	0,36	0,37	0,47	0,38	0,35	0,38	0,37	0,35	0,45

Tabelle 5-1: Mittelwerte (MW) und Streuung (SDV) des statischen Drucks in Abhängigkeit vom eingesetzten Druckaufnehmer (n = 5)

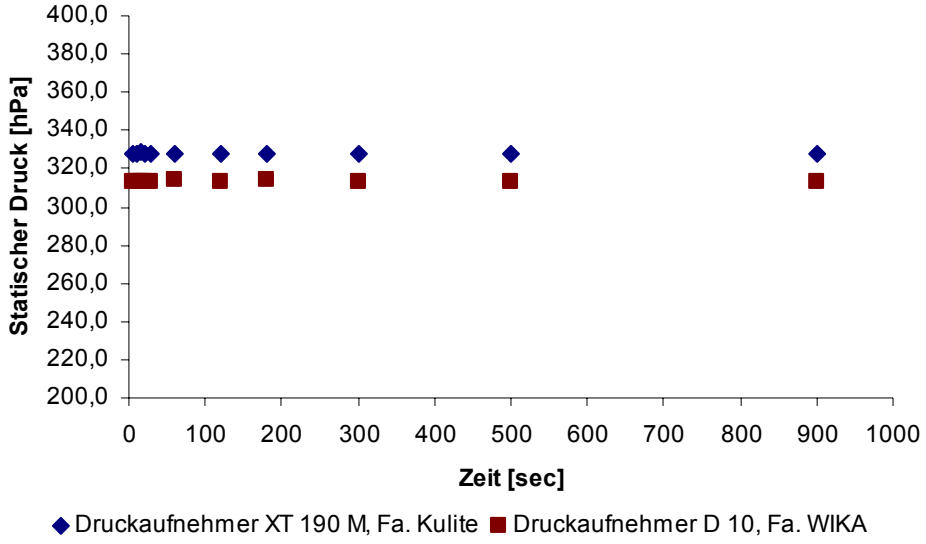


Abbildung 5-1: Vergleich der Messdauer für den statischen Druck in Abhängigkeit vom Druckaufnehmer, Messpunkt auf dem Radius r = 35,5 mm

Abbildung 5-1 kann entnommen werden, dass eine längere Messdauer keinen signifikanten Einfluss auf die statischen Druckwerte nimmt. Schon eine Messung im Sekundenbereich liefert ausreichend genaue Werte. Haben sich einmal stabile Druck- und damit Strömungsverhältnisse in der Mahlkammer aufgebaut, erfolgt auch bei längerer Messwerterfassung keine Änderung mehr.

Die Werte des Druckaufnehmers D 10 mit Druckkanal liegen grundsätzlich ca. 15 hPa unter denen des Sensors XT 190 M mit frontbündiger Membran. Bei der Betrachtung dieses Unterschiedes dürfen jedoch die Messungenauigkeiten der genutzten Sensoren nicht außer Acht gelassen werden. Der Messfehler des Druckaufnehmers der Firma Kulite XT 190 M liegt im Bereich von ± 25 hPa, für den D 10 der Firma WIKA werden Ungenauigkeiten von ± 6 hPa angegeben [16, 19]. Die aufgezeichneten statischen Druckwerte liegen folglich alle innerhalb dieses Schwankungsbereiches. In einer

Fehlerrechnung, siehe Kapitel 5.3.7, wird genau beschrieben, wie sich diese Messfehler auf die ermittelten Geschwindigkeitswerte auswirken.

In den weiteren Versuchen wird für die Messungen des statischen Drucks trotz leicht erhöhter Streuung der Sensor XT 190 M mit frontbündiger Membran verwendet. So soll ein späterer Vergleich der Druckwerte mit den Messdaten von Rief möglich sein, die für ihre Arbeit auch diesen Druckaufnehmer nutzte.

5.1.2 Statischer Druck in Abhängigkeit von der Position des Druckaufnehmers

Durch Drehen des Mahlkammerdeckels um jeweils 30° im Uhrzeigersinn wird der statische Druck auf dem äußeren Radius von 35,5 mm an zwölf verschiedenen Positionen, vgl. Tabelle 4-4, aufgenommen. Auch andere Autoren stellen fest, dass sich der Messpunkt auf diesem Radius der Mahlkammer besonders eignet, um den Betriebszustand in der Mühle genau zu charakterisieren [4, 49, 66]. Wenn sich der Sensor wie hier oberhalb der vermuteten Zerkleinerungszone befindet, können Druckschwankungen mit hoher Genauigkeit erfasst werden.

Tabelle 5-2 gibt Mittelwerte der aufgezeichneten Druckwerte bei veränderter Position des Druckaufnehmers auf dem Radius von 35,5 mm an:

Position	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**
MW [hPa]	323,9	323,9	318,8	327,9	319,0	320,1	315,0	314,0	313,2	314,1	316,3	319,0
SDV [hPa]	0,45	0,43	0,46	0,45	0,41	0,41	0,40	0,38	0,44	0,43	0,43	0,62

Tabelle 5-2: Mittelwerte und Streuung des statischen Drucks in Abhängigkeit von der Position des Druckaufnehmers auf dem Radius 35,5 mm (n = 5)

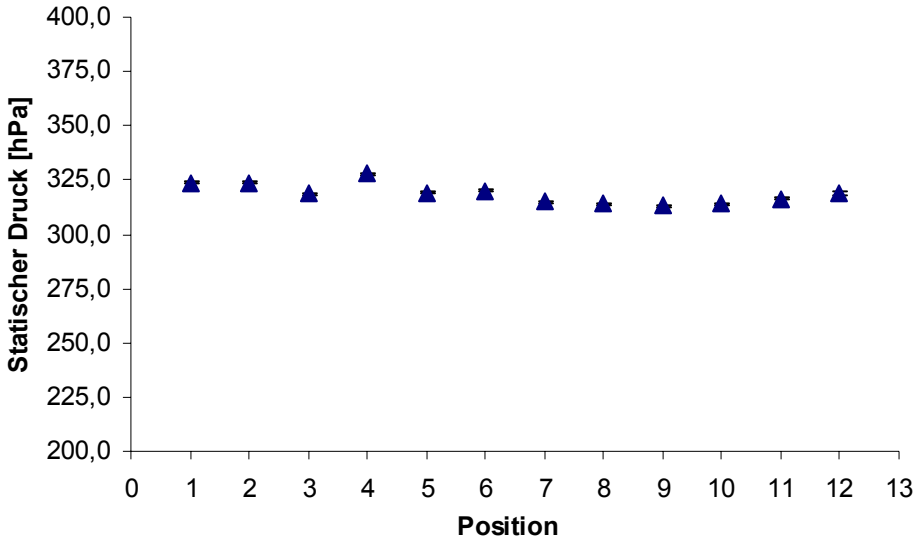


Abbildung 5-2: Verlauf des statischen Drucks ohne Feststoffbeladung in Abhängigkeit von der Position des Druckaufnehmers auf dem Radius 35,5 mm

Abbildung 5-2 zeigt, dass die statischen Druckwerte unabhängig von der Position über der Wandschicht praktisch konstant sind und nur um ± 8 hPa um den mittleren Wert schwanken. Ein Einfluss der Düsen auf die statischen Druckwerte ist nicht erkennbar. Position 8 befindet sich direkt über einer Treibstrahldüse, ein erhöhter Messwert kann jedoch nicht aufgenommen werden. Für das weitere Vorgehen werden die folgenden statischen Messungen immer an der Position 4 durchgeführt, da hier der höchste statische Druckwert auftritt. Damit wird garantiert, dass der Fehler bei der nachfolgenden Geschwindigkeitsberechnung möglichst gering ist.

5.1.3 Statischer Druck in Abhängigkeit vom Radius

Für weitere Versuche im Leerbetrieb der Mühle ist die Aufnahme von statischen radialen Druckverhältnissen notwendig. Die folgende Tabelle 5-3 listet die Mittelwerte der Messwerte auf:

Radius [mm]	**35,5**	**26,5**	**17,0**	**13,0**	**11,0**	**9,0**	**4,0**	**0,0**
MW [hPa]	327,9	249,1	145,0	104,8	42,4	1,5	-26,4	-51,0
SDV [hPa]	0,49	0,34	0,23	0,21	0,16	0,13	0,19	0,87

Tabelle 5-3: Mittelwerte und Streuung des statischen Drucks in Abhängigkeit vom Radius der Mahlkammer (n = 5)

Die Lage der einzelnen Bohrungen auf den Radien wurde bereits in Tabelle 4-5 aufgeführt. Abbildung 5-3 zeigt die gemittelten Ergebnisse, die aus Druckmessungen an acht über den Radius verteilten Messpunkten resultieren:

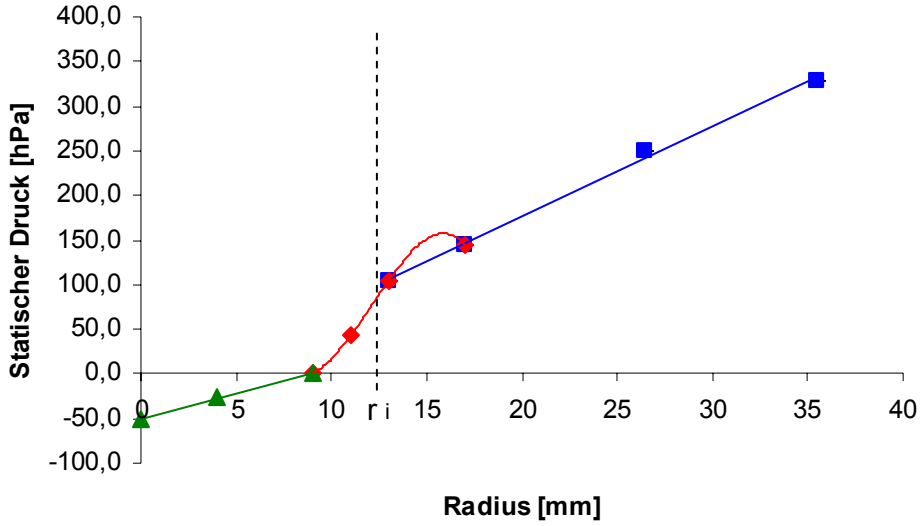


Abbildung 5-3: Verlauf des statischen Drucks in Abhängigkeit vom Mahlkammerradius, gemessen an Position 4 (r_i Tauchrohrradius)

Der statische Wanddruck fällt kontinuierlich von äußeren Radien der Mahlkammer in Richtung ihres Mittelpunktes ab. Die Standardabweichungen werden ebenfalls mit abnehmendem Radius geringer, nur im Mahlkammermittelpunkt ist, wie zu erwarten, die größte Schwankung zu beobachten, da hier im Mittelpunkt des Sogs unbeständige Bewegungen herrschen. Auf Grund der über das Abscheiderohr abfließenden Strömung entsteht ein stärkerer Druckabfall unterhalb des Tauchrohrradius von 12,5 mm.

Der dargestellte Druckverlauf steht in Einklang mit den Untersuchungen von Muschelknautz [52], welche ebenfalls radiale Kennlinien für den Leerbetrieb einer Mühle zeigen. Der hier auftretende größere Druckunterschied lässt sich auf andere geometrische Abmessungen der Messeinrichtung (Mahlkammerdurchmesser und Düsenanstellwinkel) sowie höhere Mahl- und Injektordrücke zurückführen.

Die in dieser Versuchsreihe gemessenen statischen Druckwerte werden der späteren Berechnung des dynamischen Drucks zugrunde gelegt. Im Hinblick auf nachfolgende Messungen des Gesamtdrucks mittels Pitot-Rohr muss berücksichtigt werden, dass das Rohr mit 13 mm Kopflänge um einen bestimmten Winkel innerhalb der jeweiligen Bohrung gedreht wird. Somit wird je nach optimaler Anströmung der tatsächliche Druckwert auf verschiedenen Radien benötigt. Da nicht auf jedem Radius der Mahlkammer eine Messung erfolgen kann, werden die fehlenden statischen Druckwerte

interpoliert. Mit Hilfe von abschnittsweise aufgestellten Funktionsgleichungen kann der statische Druckwert für jeden bestimmten Radius innerhalb des angegebenen Definitionsbereiches ermittelt werden, wie Tabelle 5-4 zeigt:

Definitionsbereiche Radien [mm]	Funktionsgleichung	R^2
[13,0 ; 40,0]	y = 10,025 x – 23,874	0,998
[9,0 ; 13,0]	$y = -0{,}775\,x^3 + 28{,}249\,x^2 - 311{,}27\,x + 1079{,}6$	1
[0,0 ; 9,0]	y = 5,8275 x – 50,579	0,999

Tabelle 5-4: interpolierte Funktionsgleichungen und zugehörige Korrelationskoeffizienten zur Berechnung der fehlenden statischen Druckwerte innerhalb der angegebenen Definitionsbereiche

Zur genauen mathematischen Beschreibung des Druckabfalls über dem Tauchrohr wird zusätzlich der statische Druckwert, gemessen auf dem Radius 17,0 mm, zur Erstellung des kubischen Polynoms herangezogen. Auf diese Weise lässt sich die Funktion so genau wie möglich für den Definitionsbereich von 9,0 bis 13,0 mm angeben.

5.1.4 Statischer Druck in Abhängigkeit vom Mahldruck

Um den Einfluss gesteigerter Mahlenergie auf die maximal auftretende Geschwindigkeit in der Mühle zu untersuchen, wird der Vordruck des Mahlgases schrittweise bis auf $6{,}0 \cdot 10^5$ Pa erhöht. Da zur Berechnung der Geschwindigkeit der statische Druck im peripheren Mahlkammerbereich benötigt wird, sind auf den Radien 35,5 mm und 26,5 mm Messungen durchzuführen, um wiederum Geradengleichungen für diesen radialen Abschnitt aufzustellen.

Mahldruck [10^5 Pa]	stat. Druck [hPa] für r = 35,5 mm, MW ± SDV	stat. Druck [hPa] für r = 26,5 mm, MW ± SDV	Geradengleichung für den Definitionsbereich Radius [26,5 mm ; 40,0 mm]
4,0	327,9 ± 0,49	249,1 ± 0,33	y = 10,025 x – 23,874
4,5	356,4 ± 0,42	266,3 ± 0,54	y = 10,004 x + 1,2022
5,0	405,1 ± 0,40	310,8 ± 0,32	y = 10,476 x + 33,238
5,5	441,0 ± 1,00	342,0 ± 0,41	y = 11,000 x + 50,54
6,0	487,3 ± 0,89	375,5 ± 0,64	y = 12,422 x + 46,271

Tabelle 5-5: Mittelwerte und Streuung des statischen Drucks in Abhängigkeit vom Mahldruck, gemessen an Position 4 auf den Radien 35,5 mm und 26,5 mm zur Aufstellung der zugehörigen Geradengleichungen (n = 5)

Abbildung 5-4 stellt die Ergebnisse dar, die aus fünffachen Messungen bei unverändertem Mahlspalt von 5 mm resultieren:

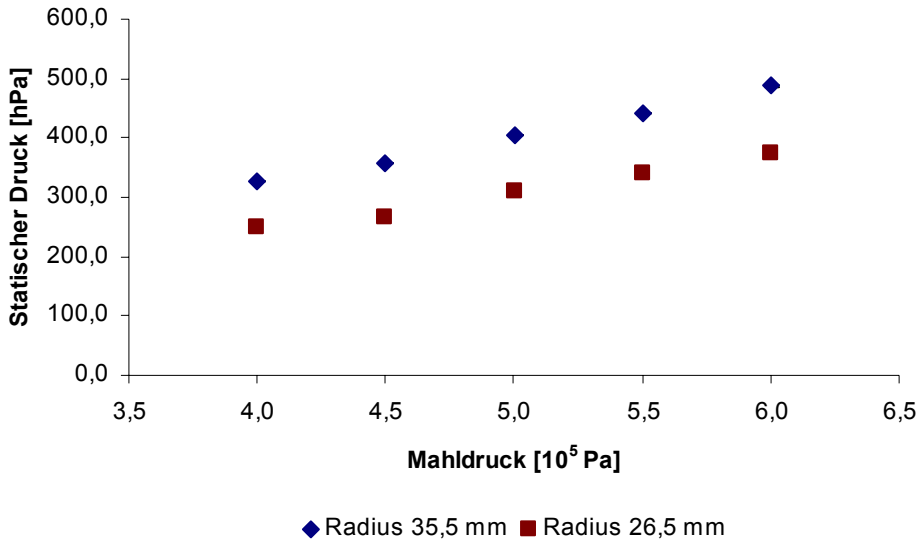


Abbildung 5-4: Statischer Druck in Abhängigkeit vom Mahldruck und Radius, gemessen an Position 4

Die Graphik zeigt, dass bei Steigerung des Mahldrucks um jeweils $0{,}5 \cdot 10^5$ Pa der statische Druck ebenfalls proportional zunimmt. Bei Linearisierung der Messwerte mit erhöhtem Mahldruck für den Radius 35,5 mm beträgt der Korrelationskoeffizient $R^2 = 0{,}99$, der für den Radius 26,5 mm $R^2 = 0{,}98$. Somit steigt der statische Druck mit Erhöhung des Mahldrucks nahezu linear an. Für die Berechnung der Geschwindigkeit ist neben den Geradengleichungen die Ermittlung des Gesamtdrucks notwendig, die in Kapitel 5.3.6 beschrieben wird.

5.1.5 Statischer Druck in Abhängigkeit von der Feststoffkonzentration

Erfolgreiche Zerkleinerung setzt eine bestimmte Feststoffbeladung der Strahlmühle voraus. Wie schon in Kapitel 2.2.1 erläutert, müssen ausreichend Pulverpartikel vorliegen, damit sich diese durch gegenseitigen Prall zerkleinern. Wird die Gutzufuhr weiter gesteigert und tritt sogar eine Überladung der Mühle mit Pulver ein, wird die Geschwindigkeit der Strömung durch vermehrte Reibung der Partikel beim Aufprall entsprechend vermindert. Der Feststoff wird nicht mehr effektiv zerkleinert, sondern als Grobgut ausgetragen [37]. An Hand von Messungen des statischen Drucks lässt sich erkennen, ob bei der gewählten Förderrate des Pulvers Strömungsinstabilitäten in der Mahlkammer auftreten, die sich in starken Druckschwankungen bemerkbar machen.
Der Einfluss der Feststoffbeladung auf den statischen Druck wird mit folgender Versuchsreihe untersucht: Die bisherige Einstellung der operativen Parameter (Mahldruck $4{,}0 \cdot 10^5$ Pa, Injektordruck $4{,}5 \cdot 10^5$ Pa, Mahlspalt 5 mm) wird beibehalten, um

Vergleiche der Druckwerte mit und ohne Gutbeladung der Strahlmühle zu ermöglichen. Da durch den Mahldruck ein konstanter Gasmassenstrom vorgegeben ist, muss nun ein geeigneter Pulverdurchsatz mittels “trial and error“-Verfahrens ermittelt werden. Dazu wird der Druckaufnehmer zur Messung des statischen Drucks auf dem Radius 35,5 mm an Position 4 in den Mahlkammerdeckel eingebaut und Messwerte über einen Zeitraum von 10 Minuten aufgenommen. Abbildung 5-5 zeigt die erhaltenen Druckkurven in Abhängigkeit von der Messdauer bei verschiedenen Förderraten (FR), vgl. auch Anhang 9.4, der eingesetzten Substanz Criscarb®:

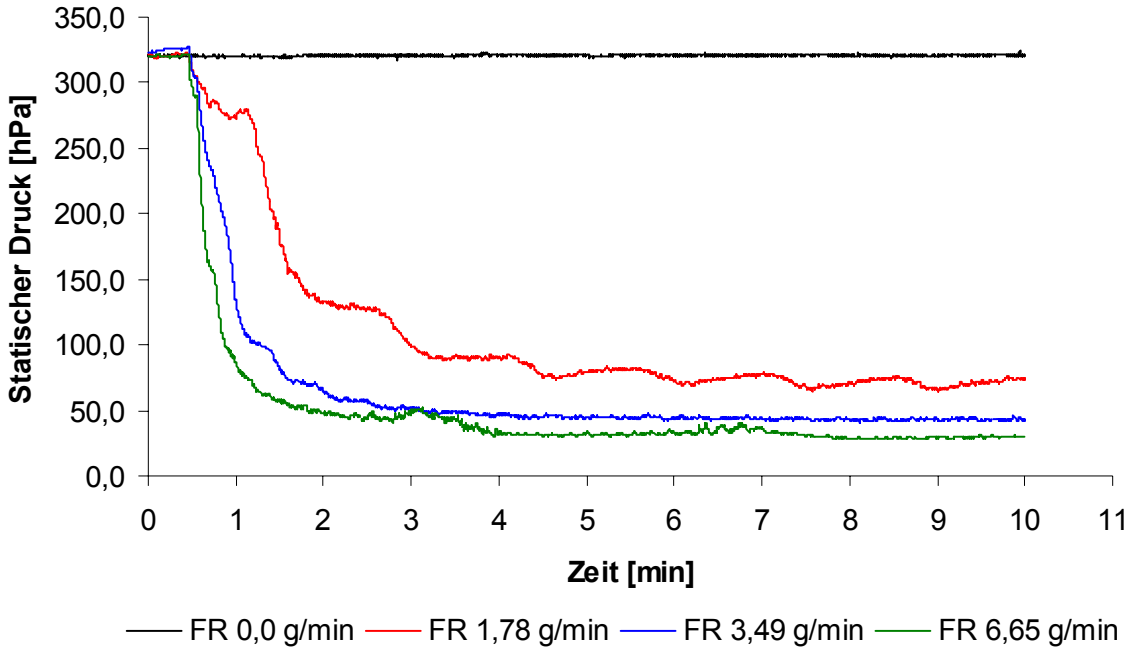


Abbildung 5-5: zeitlicher Verlauf des statischen Drucks bei instabilen und stabilen Mahlbedingungen sowie verschiedenen Förderraten der Modellsubstanz Criscarb®, Mahldruck $4{,}0 \cdot 10^5$ Pa, Injektordruck $4{,}5 \cdot 10^5$ Pa, Mahlspalt 5 mm, Radius 35,5 mm, Position 4, 10 min

Zunächst baut sich in der Mahlkammer ein gleichmäßiger Druck auf, der dem statischen Druck bei Leerbetrieb der Mühle entspricht, wie der obere Graph veranschaulicht. Die Feststoffzufuhr erfolgt nach 30 Sekunden. Durch hohe Reibungseffekte und Zerkleinerung der Partikel wird die Spiralströmung abgebremst mit der Folge, dass der Druck in der Mahlkammer sinkt.

Der periodische Verlauf der roten Druckkurve deutet auf instabile Mahlbedingungen hin, die sich auf eine unzureichende Feststoffmenge bei gleichzeitig hohem Energieeintrag zurückführen lassen. Eine Förderrate von 1,78 g/min reicht bei dem gewählten Mahldruck nicht aus, um stabile Strömungszustände zu gewährleisten. Die starken Druckschwankungen lassen vermuten, dass das Pulver nicht gleichmäßig von der

Strömung erfasst und effektiv zerkleinert wird [4, 49]. Um bei gegebenem Mahldruck und -spalt stabile Strömungsbedingungen zu erzielen, muss die Förderrate erhöht werden, wie die folgenden Kurven veranschaulichen.

Erfolgt ein ausreichender Feststoffdurchsatz, in diesem Fall von 3,49 g/min, stellt sich nach einer Messdauer von ca. 3,5 Minuten [23, 73] ein stationärer Zustand ein, wie in der blauen Kurve erkennbar ist. Der statische Druck pendelt sich auf einen konstanten Wert ein.

Entsprechend den Untersuchungen von Marquardt [43], Müller [49], Muschelknautz [52] und Rief [66] resultieren aus einem erhöhten Feststoffdurchsatz niedrigere statische Druckwerte. Zu hohe Pulverkonzentrationen führen jedoch zu instabilen Strömungszuständen, wie die untere Druckkurve veranschaulicht. Bei einer Förderrate von 6,65 g/min treten kurzzeitige Druckschwankungen auf, deren Ursache in einer unkontrollierten Entladung der Strahlmühle zu sehen ist. Dabei werden die Partikel nur unzureichend zerkleinert und als Grobgut, erkennbar an einer breiten Korngrößenverteilung, abgeschieden.

Die hochfrequente Oszillation der Druckwerte, die in allen Graphen deutlich hervortritt, resultiert aus feinsten Schwankungen der Gutzufuhr in die Mahlkammer.

Im Hinblick auf die Gesamtdruckmessungen mittels Pitot-Rohr soll der Feststoffdurchsatz so gering wie möglich sein, um ein schnelles Verstopfen des Messrohres zu vermeiden. Bei einer Förderrate von 1,78 g/min werden jedoch keine stabilen Mahlbedingungen erzielt, so dass für die weiteren Versuche mit Pulverbeladung der Mühle die optimale Förderrate von 3,49 g/min ausgewählt wird.

5.1.6 Statischer Druck in Abhängigkeit von der Position des Druckaufnehmers bei Feststoffbeladung

Der statische Druck wird nun in Abhängigkeit von der Position des Druckaufnehmers bei einer Förderrate des Mahlgutes von 3,49 g/min untersucht. Dazu wird der Druck auf dem Radius 35,5 mm an zwölf Positionen über eine Messdauer von 10 Minuten aufgenommen. Nach 3,5 Minuten ist der stationäre Betriebszustand in der Mühle erreicht. Zur Auswertung werden daher die Druckwerte in diesem “steady state“ herangezogen. Tabelle 5-6 gibt Mittelwerte und Standardabweichungen aus jeweils drei Mahlvorgängen an den unterschiedlichen Positionen wieder:

Position	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
MW [hPa]	55,4	65,0	58,0	61,5	56,4	47,2	52,0	56,3	64,1	54,6	52,3	56,2
SDV [hPa]	4,68	7,61	7,68	8,25	5,04	6,18	6,55	5,30	5,99	7,75	6,84	5,78

Tabelle 5-6: Mittelwerte und Streuung des statischen Drucks in Abhängigkeit von der Position des Druckaufnehmers bei Feststoffbeladung, gemessen auf dem Radius 35,5 mm über 10 Minuten (n = 3)

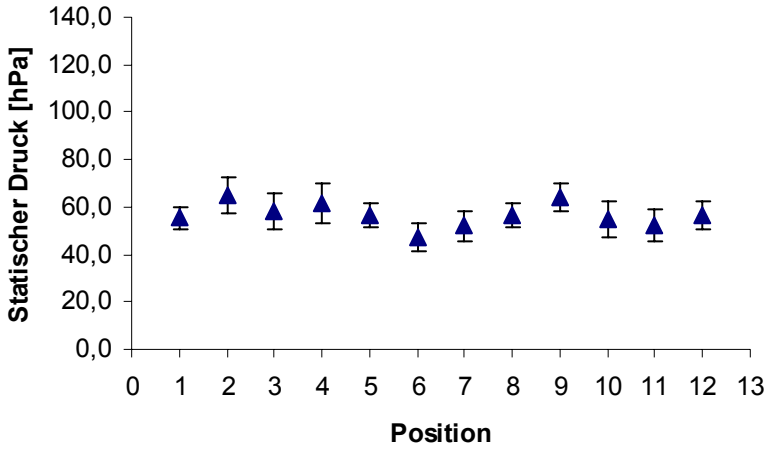


Abbildung 5-6: Verlauf des statischen Drucks in Abhängigkeit von der Position des Druckaufnehmers bei Feststoffbeladung, gemessen auf dem Radius 35,5 mm

Abbildung 5-6 zeigt Mittelwerte des statischen Drucks bei Feststoffbeladung der Strahlmühle in Abhängigkeit von der Position des Druckaufnehmers. Die zahlreichen Pulverpartikel bremsen die Spiralströmung derartig ab, dass der statische Druck sinkt. Im Vergleich zu Messungen im Leerbetrieb der Mühle sind die Druckwerte um ca. 250 hPa erniedrigt. Dieser analoge Druckabfall lässt sich bereits in den von Rief [66] durchgeführten Zerkleinerungsuntersuchungen der Modellsubstanz Criscarb® bei gleicher Einstellung der operativen Parameter beobachten.

Zur genaueren Betrachtung eines möglichen Einflusses der Messposition auf den statischen Druck dient eine Projektion der Lage der einzelnen Positionen in Bezug zu den Treibstrahldüsen. Tabelle 5-7 gibt dazu die Lage der einzelnen Messpositionen an:

Position	4	1	6	11	9	2	7	12	5	10	3	8
nach Düse [°]	3	5	11	17	29	35	41	47	53	59	65	71
vor Düse [°]	49	67	61	55	43	37	31	25	19	13	7	1

Tabelle 5-7: Lage der Messpositionen vor und nach den Treibstrahldüsen, aufgezeichnet auf dem Radius 35,5 mm

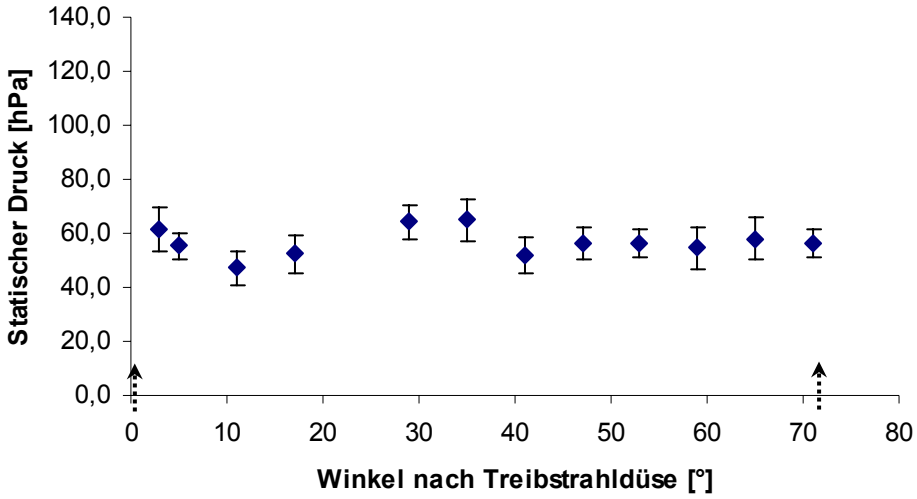


Abbildung 5-7: Verlauf des statischen Drucks in Abhängigkeit von den Messpositionen bei Feststoffbeladung, gemessen auf dem Radius 35,5 mm, angegeben als Winkel nach der Treibstrahldüse. Die einzelnen Messpositionen werden zwischen zwei Düsen (dargestellt durch gestrichelte Pfeile) projiziert.

Ein Zusammenhang zwischen der Messposition des Druckaufnehmers in Bezug zu den Treibstrahldüsen und den aufgenommenen Druckwerten lässt sich trotz auftretender Schwankungen nicht erkennen, wie Abbildung 5-7 zeigt. Demnach müsste z. B. an Position 8 auf Grund der unmittelbaren Nähe zu einer Düse der höchste statische Druckwert auftreten. Die Annahme wird jedoch bestätigt, dass der an der Wandschicht der Mühle gemessene statische Druck vornehmlich von radialen Strömungsverhältnissen in der Mahlkammer beeinflusst wird, hingegen nicht von der Position des Druckaufnehmers.

5.1.7 Statischer Druck in Abhängigkeit vom Mahldruck bei Feststoffbeladung

In dieser Versuchsreihe wird der Einfluss eines gesteigerten Energieeintrags auf die statischen Druckwerte bei Feststoffzufuhr untersucht. Dazu ist der Vordruck des Mahlgases stufenweise von $4{,}0 \cdot 10^5$ Pa auf $6{,}0 \cdot 10^5$ Pa zu erhöhen. Die Messungen erfolgen auf den äußeren Radien der Mahlkammer r = 35,5 mm und 26,5 mm, um Geradengleichungen zur späteren Geschwindigkeitsberechnung aufzustellen, vgl. Tabelle 5-8:

Mahldruck [10^5 Pa]	stat. Druck [hPa] für r = 35,5 mm, MW ± SDV	stat. Druck [hPa] für r = 26,5 mm, MW ± SDV	Geradengleichung für den Definitionsbereich Radius [26,5 mm ; 40,0 mm]
4,0	61,5 ± 8,25	41,2 ± 2,87	y = 2,256 x - 18,572
4,5	80,0 ± 3,87	48,9 ± 9,08	y = 3,5519 x - 45,257
5,0	95,1 ± 2,69	63,1 ± 6,39	y = 3,5556 x - 31,122
5,5	106,7 ± 3,49	87,5 ± 3,44	y = 2,1296 x + 31,098
6,0	115,4 ± 2,94	95,9 ± 6,17	y = 2,1667 x + 38,483

Tabelle 5-8: Mittelwerte und Streuung des statischen Drucks in Abhängigkeit vom Mahldruck bei Feststoffbeladung, gemessen auf den Radien 35,5 mm und 26,5 mm zur Aufstellung der zugehörigen Geradengleichungen, Position 4, 10 Minuten (n = 3)

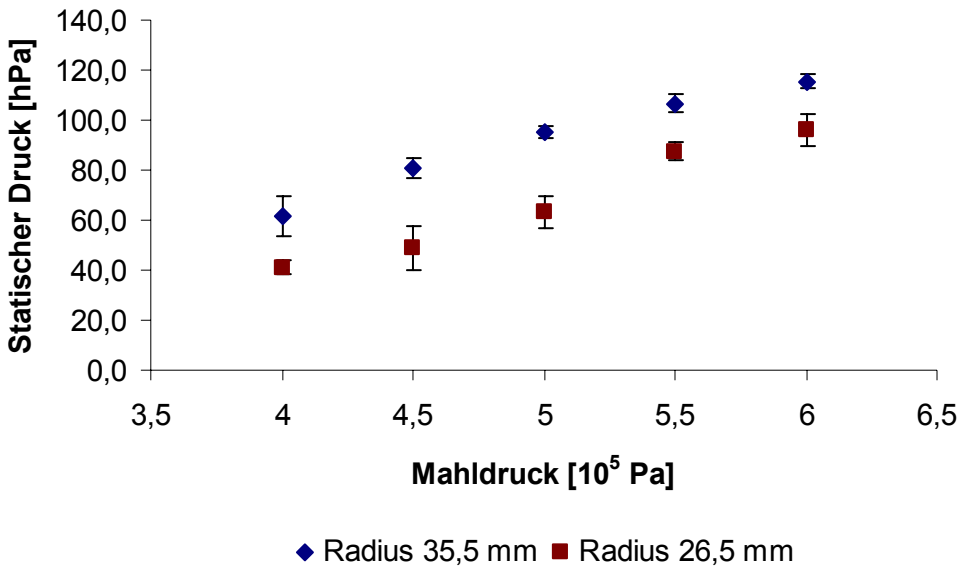


Abbildung 5-8: Statischer Druck in Abhängigkeit vom Mahldruck und Radius bei Feststoffbeladung, gemessen an Position 4

Abbildung 5-8 veranschaulicht, wie der statische Druck auch bei Feststoffbeladung der Mühle mit zunehmendem Mahldruck ansteigt. Die Schwankungen dieser Messwerte sind deutlich höher als die Streuungen der Druckwerte, aufgezeichnet ohne Mahlgut, jedoch liegen sie im Bereich der Messungenauigkeit des Druckaufnehmers von ± 6 hPa.

Zur Kontrolle eines erfolgreichen Zerkleinerungsprozesses wird ferner die Korngrößenverteilung der Mahlsubstanz Criscarb® mit Hilfe des Coulter Counters®, vgl. Kapitel 4.2.5, bestimmt. Wie bereits in Kapitel 4.2.6 erläutert, lassen sich diese Summenverteilungen mit Hilfe des RRSB-Netzes durch Lageparameter und Gleichmäßigkeitszahl charakterisieren. Entsprechend der Theorie der Prallzerkleinerung nach Rumpf [70] ist davon auszugehen, dass bei höheren Energieeinträgen ein

feinkörnigeres Mahlprodukt erzielt wird. Feine Zerkleinerungsprodukte mit enger Verteilung können durch kleine Lageparameter sowie große Gleichmäßigkeitskoeffizienten beschrieben werden.

Tabelle 5-9 gibt sowohl die gemittelten Mediane als auch Lageparameter und Gleichmäßigkeitszahlen einer fünffachen Bestimmung jeweils abhängig von Mahlvorgängen mit verändertem Mahldruck an:

Mahldruck [10^5 Pa]	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0
Median x 50 [µm]	5,164	4,765	4,294	4,058	3,957
SDV [µm]	0,120	0,097	0,044	0,023	0,028
Lageparameter d' [µm]	7,647	6,915	5,994	5,617	5,396
SDV [µm]	0,169	0,162	0,098	0,052	0,058
Gleichmäßigkeitszahl n [-]	1,043	1,101	1,198	1,228	1,261
SDV [-]	0,042	0,020	0,011	0,009	0,004

Tabelle 5-9: Mediane, Lageparameter sowie Gleichmäßigkeitszahlen aus den Partikelgrößenanalysen in Abhängigkeit von Mahlvorgängen mit variiertem Mahldruck (n = 5)

Die folgende Abbildung 5-9 stellt die zwei charakteristischen Kennzahlen Lageparameter sowie Gleichmäßigkeitszahl in Abhängigkeit vom Mahldruck graphisch dar:

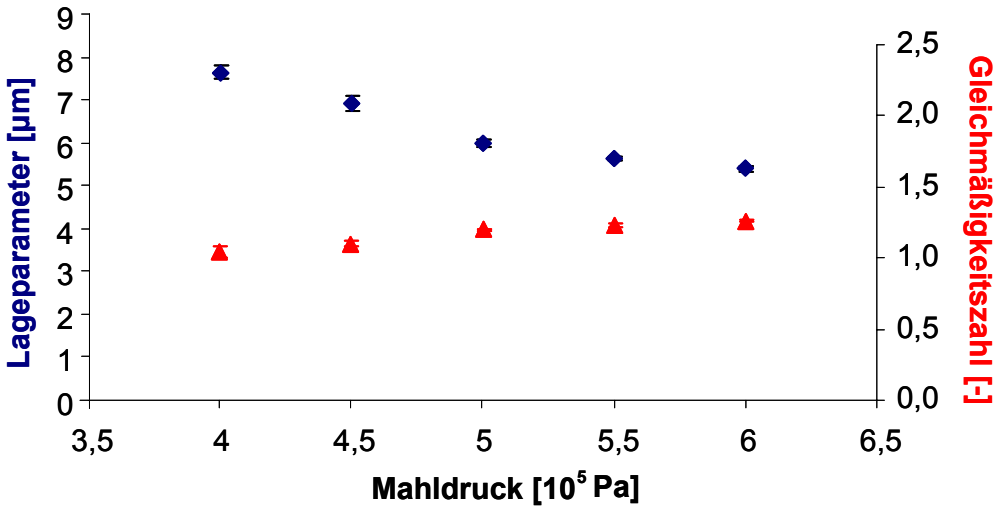


Abbildung 5-9: Einfluss des Mahldrucks auf den Lageparameter d' und Gleichmäßigkeitskoeffizienten n

Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass bei ansteigendem Mahldruck sowohl Median als auch Lageparameter geringer werden, der Gleichmäßigkeitskoeffizient jedoch zunimmt. Es entstehen also feinere Mahlprodukte mit engerer Korngrößenverteilung. Bei weiterer

Erhöhung des Mahldrucks ist dennoch keine größere Feinheit des Produktes zu erzielen. Wie schon in Kapitel 2.2.1 erläutert, lassen sich Pulverpartikel nur bis zu einer Grenzkorngröße zerkleinern. Auf Grund des abnehmenden Partikeldurchmessers werden keine ausreichend hohen Geschwindigkeiten mehr für einen Zusammenstoß erreicht. Um feinere Mahlprodukte zu erhalten, müsste der Mahlspalt vergrößert oder der Feststoffdurchsatz vermindert werden. Dies steht in der vorliegenden Arbeit jedoch nicht im Vordergrund der Untersuchungen.

Diese Ergebnisse sind in guter Übereinstimmung mit den Messdaten von Marquardt [43] und Rief [66] anzusehen, die sowohl an Hand der Mediane als auch der RRSB-Verteilungen Rückschlüsse auf die Zerkleinerungsleistung der Strahlmühle gezogen haben und ebenfalls feststellten, dass bei erhöhtem Energieeintrag feinere Mahlprodukte mit engeren Partikelgrößenverteilungen entstehen.

5.2 Konstruktion eines geeigneten Pitot-Rohres

Das Pitot-Rohr stellt eine einfache Methode zur Erfassung des Gesamtdrucks in der Spiralstrahlmühle dar. Für diese Druckmessungen muss zunächst ein geeignetes Pitot-Rohr angefertigt werden, um reproduzierbare Ergebnisse zu erhalten. Erste Rohre werden nach groben Richtwerten und Konstruktionshinweisen in der Literatur [46, 56, 81] gefertigt und liefern zunächst keine sinnvollen Messergebnisse. Probleme treten zudem bei der Anfertigung, besonders bei der Biegung des Rohres um 90° zur L-Form, auf. Knickstellen und Beschädigungen sind zu vermeiden. Durch weitere Anpassungen an das in der Literatur [20, 57] vorgegebene d/D-Verhältnis von ungefähr 0,7 und kleine Veränderungen der Kopflänge steht eine Auswahl an Pitot-Rohren zu Vergleichsmessungen zur Verfügung. Tabelle 5-10 gibt eine Übersicht über die angefertigten Pitot-Rohre, die bei optimaler Anströmung die besten Ergebnisse liefern:

Rohr Nr.	d [mm]	Wandstärke [mm]	D [mm]	d/D [-]	Kopflänge
1	0,8	0,15	1,1	0,73	13 mm = 16,25 d
2	1,0	0,2	1,4	0,71	13 mm = 13 d
3	0,8	0,15	1,1	0,73	8,7 mm = 10,875 d
4	1,0	0,2	1,4	0,71	8,7 mm = 8,7 d
5	0,8	0,15	1,1	0,73	6,6 mm = 8,25 d
6	1,0	0,2	1,4	0,71	6,6 mm = 6,6 d

Tabelle 5-10: Übersicht über die angefertigten Pitot-Rohre, (d) Innendurchmesser (D) Außendurchmesser (d/D) Innendurchmesser- zu Außendurchmesserverhältnis

Die sechs Rohre variieren in ihren Verhältnissen von Innendurchmesser zu Außendurchmesser sowie der Kopflänge. Damit sich das Rohr besser der spiraligen Strömung anpasst, ist die Kopfspitze mit einem Radius von R = 40 mm gebogen.

Es soll gezeigt werden, welchen Einfluss derartige Veränderungen auf den Gesamtdruck nehmen. Dazu wird das jeweilige Pitot-Rohr auf dem Radius 35,5 mm mit Distanzrohr in den Mahlkammerdeckel eingebaut. Ausgehend von Vorversuchen und theoretischen Überlegungen wird vermutet, dass auf diesem Radius direkt vor einer Düse, an Position 4, der höchste Gesamtdruckwert auftritt. Die Aufzeichnung des Gesamtdrucks erfolgt mittels Drucksensor D 10, siehe Kapitel 5.1.1.

Rohr Nr.	1	2	3	4	5	6
Kopflänge / d [-]	16,25	13	10,875	8,7	8,25	6,6
MW [hPa]	898	634	589	534	516	516
SDV [hPa]	1,14	5,89	2,26	1,84	1,69	1,63

Tabelle 5-11: Mittelwerte und Streuung des Gesamtdrucks, aufgenommen mit sechs verschiedenen Pitot-Rohren auf dem Radius 35,5 mm, Eintauchtiefe 6 mm, Position 4, Anströmwinkel -5° (n = 5)

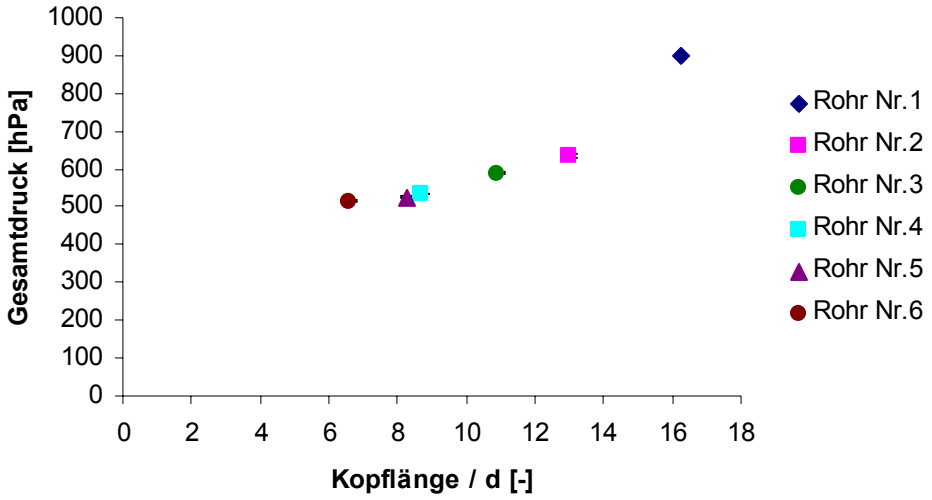


Abbildung 5-10: Mittelwerte des Gesamtdrucks in Abhängigkeit von der Kopflänge, angegeben als Vielfaches des Innendurchmessers d, gemessen auf dem Radius 35,5 mm jeweils bei optimaler Anströmung

Abbildung 5-10 stellt die Mittelwerte des Gesamtdrucks dar, welche mit sechs verschiedenen Pitot-Rohren aufgezeichnet werden. Rohr Nr. 1 erzielt die höchsten Druckwerte bei geringster Streuung. Der Graphik ist weiterhin zu entnehmen, dass bei zunehmender Kopflänge des Rohres der gemessene Gesamtdruck unabhängig vom d/D-Verhältnis steigt, vgl. auch Tabellen 5-10 und 5-11. Somit ist ein langer Kopf am Pitot-Rohr erwünscht, um optimale Druckwerte aufzunehmen. Bei Kopflängen größer als 13 mm stößt das Pitot-Rohr auf Grund der kleinen Mahlkammer an Mahlkammerwand und Tauchrohr, so dass nur begrenzt Messwerte aufgezeichnet werden können. Daher wird für alle weiteren Versuchsreihen Rohr Nr. 1 mit einer Kopflänge von 13 mm verwendet. Die entsprechenden Konstruktionszeichnungen sind Anhang 9.5.1 und 9.5.2 zu entnehmen. Bei dem gewählten Verhältnis von Innendurchmesser zu Außendurchmesser von 0,73 ist entsprechend Abbildung 4-10 eine Abweichung des Anströmwinkels von 8° zu tolerieren, damit der Messfehler des Gesamtdrucks unter 1% bleibt. Somit kann diese durch nicht exakte Positionierung des Pitot-Rohres in der Strömung hervorgerufene Abweichung des Druckwertes bei der durchgeführten Fehlerbetrachtung, vgl. Kapitel 5.3.7, vernachlässigt werden.

5.3 Messungen des Gesamtdrucks und resultierende Strömungsgeschwindigkeiten

Nachfolgend soll erläutert werden, wie sich ein veränderter Anströmwinkel, eine andere Eintauchtiefe und Position des Pitot-Rohres sowie eine radial variierte Messposition auf den Gesamtdruck auswirken. Stellvertretend für alle Messungen wird am Beispiel des höchsten auftretenden Gesamtdruckwertes von 898 hPa der Einfluss dieser variierten Parameter beschrieben. Die aufgenommenen Gesamtdruckwerte, jeweils nach Radius und Eintauchtiefe geordnet, sind in Anhang 9.8 aufgeführt.

5.3.1 Gesamtdruck und Strömungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Anströmwinkel des Pitot-Rohres

Wie in Kapitel 4.2.1.5.2 beschrieben, ist die genaue Positionierung des Pitot-Rohres in der Strömung von außerordentlicher Bedeutung [33]. Nur in diesem Fall bildet sich ein Staupunkt aus und der Gesamtdruck kann exakt gemessen werden. Um diese Richtungsabhängigkeit genauer zu untersuchen, wird das Pitot-Rohr an jedem Messpunkt um Winkelabstände von 10° in der Strömung ausgerichtet. Nur im Bereich des maximalen Wertes wird nochmals um ± 5° variiert. Stellvertretend für die erhaltenen Ergebnisse ist in Abbildung 5-11 beispielhaft der Verlauf des Gesamtdrucks in Abhängigkeit des Anströmwinkels bei einer Eintauchtiefe des Pitot-Rohres von 6 mm dargestellt:

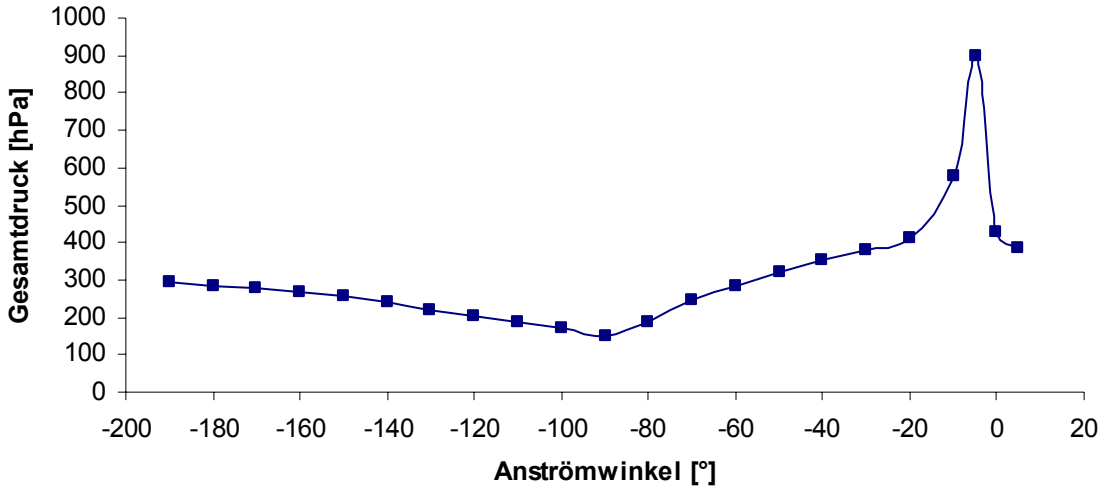


Abbildung 5-11: Einfluss des Anströmwinkels auf den Gesamtdruck, gemessen auf dem Radius 35,5 mm, Position 4, Eintauchtiefe des Pitot-Rohres 6 mm

Es ist deutlich zu erkennen, dass nur Anströmwinkel von -190° bis +10° auf dem Radius von 35,5 mm erfassbar sind. Die Mahlkammerwand begrenzt weitergehende Winkelmessungen. Ferner fällt sofort auf, dass bei einem Winkel von -5° der höchste Gesamtdruckwert von 898 hPa aufgezeichnet wird. Bei dieser Einstellung wird das Pitot-Rohr also optimal in der Strömung positioniert und direkt angeströmt. Auf Grund der Krümmung des Pitot-Rohres von R = 40 mm tritt der maximale Druckwert nicht bei direkten Anströmwinkeln von 0° auf.

Für die Bestimmung des dynamischen Drucks wird daher dieser, für jede einzelne Messpositionen experimentell zu ermittelnde, maximale Gesamtdruckwert herangezogen. Sämtliche anderen Werte fallen in den Bereich des statischen Drucks und sind nicht weiter von Relevanz. Die Ursache dieser niedrigen Messwerte ist in einer Queranströmung des Rohres zu suchen.

5.3.2 Gesamtdruck und Strömungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Eintauchtiefe des Pitot-Rohres

Neben dem Anströmwinkel soll auch die Ausrichtung des Pitot-Rohres in unterschiedlichen Eintauchtiefen der Mahlkammer untersucht werden. Dazu wird jeweils die Eindringtiefe der Rohrspitze vom Mahlkammerdeckel aus gemessen. Auf Grund der Wölbung der Mahlkammer lassen sich, abhängig vom Radius der Messbohrung, in äußeren Bereichen Eintauchtiefen von 4 bis 11 mm bzw. auf den Radien 26,5 mm und 17,0 mm nur Eintauchtiefen bis 15 mm und in der Mitte der Mahlkammer von 3 bis 4 mm erfassen. Der eingestellte Mahlspalt verhindert weitere Messungen oberhalb des Tauchrohres über 5 mm hinaus.

Abbildung 5-12 zeigt beispielhaft die maximalen Gesamtdruckwerte, die über die verschiedenen Eintauchtiefen des Pitot-Rohres an Position 4 aufgezeichnet werden. Optimale Anströmung vorausgesetzt, kann das Rohr auf dem Radius von 35,5 mm in verschiedenen Eindringtiefen von 4 bis 11 mm platziert werden. Dabei variiert der jeweilige Anströmwinkel bei der unterschiedlichen Eintauchpositionierung.

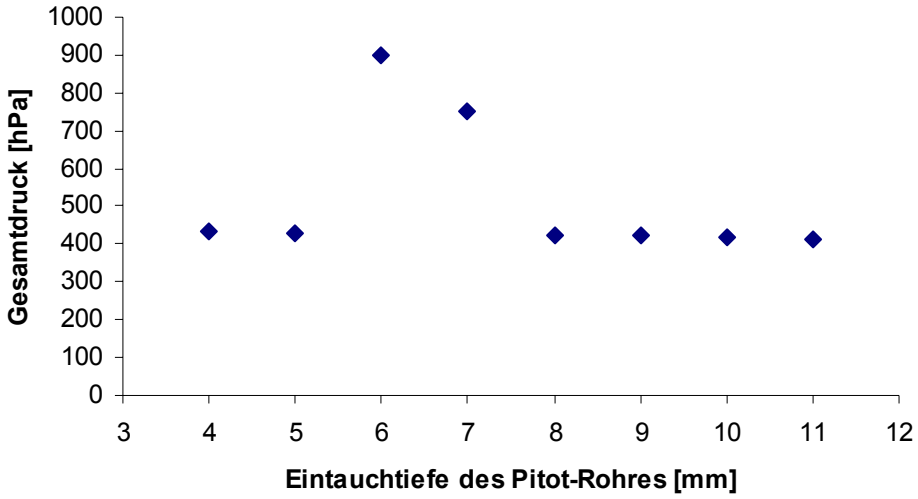


Abbildung 5-12: Einfluss der Eintauchtiefe des Pitot-Rohres auf den Gesamtdruck, aufgezeichnet bei jeweils optimaler Anströmung auf dem Radius 35,5 mm, Position 4

Die Druckwerte liegen bei geringen Eintauchtiefen (4 und 5 mm) ungefähr 12 hPa über denen von größerer Eindringtiefe (8 bis 11 mm). Eine Positionierung des Rohres in Tiefen von 6 und 7 mm in der Strömung führt zu einem deutlichen Gesamtdruckanstieg. Dieser Effekt ist auf die Positionierung des Rohres auf dem äußeren Radius in Düsennähe zurückzuführen. Hier werden der Gesamtdruck und dementsprechend auch die Geschwindigkeit am stärksten durch die Treibstrahlen beeinflusst. Desweiteren ist zu berücksichtigen, dass der Treibstrahl beim Eintritt in die Mahlkammer aufplatzt und dieser Einfluss bei den gemessenen Eindringtiefen von 6 bis 7 mm erfasst wird.

Für die Auswertung der gemessenen Daten ist daher eine Einteilung der Mahlkammerhöhe in Bereiche ober- bzw. unterhalb der Treibstrahldüsen sinnvoll, ähnlich dem “Drei-Ebenen-Modell“ von Kürten und Rumpf [36]. Dabei dient die durch die Mittelpunkte der Treibstrahldüsen aufgespannte Ebene als Bezugsebene, um ein vermutetes symmetrisches Strömungsverhalten in der Mahlkammer zu beobachten. Daneben ist ebenfalls der Strömungsverlauf entlang der Mahlkammerdeckelwölbung zu betrachten.

5.3.3 Gesamtdruck und Strömungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Position des Pitot-Rohres

Um den Einfluss der Position der Gesamtdrucksonde auf den Druckwert genauer zu untersuchen, wird für diese Messreihe der Mahlkammerdeckel bei jeder Messung um 30° im Uhrzeigersinn versetzt. Die fünf Treibstrahldüsen befinden sich im Abstand von

jeweils 72° am Umfang der Mahlkammer. In diesem Zusammenhang sei noch einmal auf Abbildung 4-15 und Tabelle 4-6 in Kapitel 4.2.2.2 verwiesen. Es wird deutlich, dass sich der Messpunkt jeweils an einer anderen Position in Bezug zu einer Treibstrahldüse befindet. Zusätzlich muss auch noch die Kopflänge des Pitot-Rohres von 13 mm berücksichtigt werden, um die tatsächliche Messposition in der Spiralstrahlmühle zu erhalten. Diese Positionen liegen nicht immer genau auf demselben Radius, bedingt durch einen unterschiedlichen Anströmwinkel des Pitot-Rohres. Auf Grund der gleichmäßigen Spiralströmung sowie der Anordnung der fünf identischen Düsen lassen sich die tatsächlichen Messpunkte zwischen zwei Düsen projizieren. Tabelle 5-12 gibt eine Übersicht über die Lage der Positionen in Bezug zu den Treibstrahldüsen auf dem Radius 35,5 mm, an denen sich das Rohr bei optimaler Anströmung befindet:

Position	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**
nach Düse [°]	56	14	44	2	32	62	20	50	8	39	69	26
vor Düse [°]	16	58	28	70	40	10	52	22	64	33	3	46

Tabelle 5-12: Lage der Messpositionen vor und nach den Treibstrahldüsen, aufgezeichnet auf dem Radius 35,5 mm, Position 4, Eintauchtiefe des Pitot-Rohres 6 mm

Zur erleichterten Übersicht dient die folgende Abbildung 5-13, welche die projizierte Lage der Messpunkte zwischen zwei Treibstrahldüsen veranschaulicht:

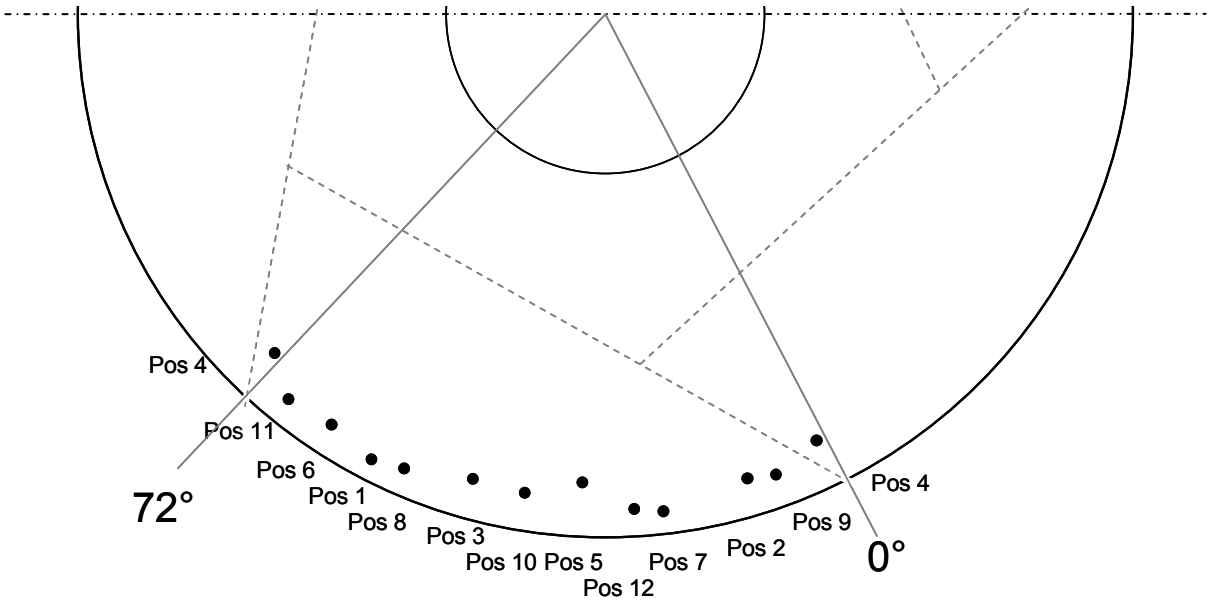


Abbildung 5-13: Übersicht über die Lage der zwölf Messpositionen bei jeweils optimaler Anströmung des Pitot-Rohres, projiziert zwischen zwei Treibstrahldüsen

Nur in der Düsenebene selbst, auf dem äußeren Radius von 35,5 mm, üben die Treibstrahlen einen Einfluss auf die Druckwerte in Abhängigkeit von der Position aus.
Daher wird für diese Ebene folgende Annahme überprüft: Je näher sich das Rohr bei optimaler Anströmung zu einer Düse ausrichtet, desto höher ist auch der gemessene Gesamtdruck sowie die resultierende Geschwindigkeit für die entsprechende Position. Dazu wird der Gesamtdruck an den zwölf bereits bekannten Messpunkten aufgenommen. Die berechneten Strömungsgeschwindigkeiten können Tabelle 5-13 entnommen werden:

Position	**4**	**9**	**2**	**7**	**12**	**5**	**10**	**(3)**	**8**	**1**	**6**	**11**
Entfernung nach der Düse [°]	2	8	14	20	26	32	39	(44)	50	56	62	69
Geschwindigkeit [m/s] bei Eintauchtiefe 6 mm	248	149	147	123	124	114	104	(122)	109	112	90	97
Geschwindigkeit [m/s] bei Eintauchtiefe 7 mm	215	176	152	148	138	118	124	(127)	114	105	84	97

Tabelle 5-13: ermittelte Strömungsgeschwindigkeiten bei Eintauchtiefen des Pitot-Rohres von 6 und 7 mm in Abhängigkeit von der Lage der Position auf dem Radius 35,5 mm, geordnet nach der Entfernung von der Düse

Die Vermutung wird eindeutig bestätigt, dass mit zunehmender Entfernung von der Treibstrahldüse der aufgezeichnete Druckwert in der Mahlkammerperipherie sinkt. Wird das Rohr an Position 4 optimal in der Strömung ausgerichtet, kann hier ein maximaler Geschwindigkeitswert von 248 m/s erfasst werden. Diese Position befindet sich genau vor einer Düse. Es folgen die Positionen 9, 2 und 7, an denen klar erkennbar ist, dass der Einfluss des Treibstrahls stetig abnimmt, bis im weiteren Verlauf die Geschwindigkeit der spiraligen Strömung im Randbereich der Mahlkammer Werte von 100 m/s erreicht. Als einzige Ausnahme ist Position 3 anzusehen, die sich direkt vor dem Injektor befindet und somit stark von diesem beeinflusst wird.

5.3.4 Auswertung der gemessenen Druck- und Temperaturwerte

Die gemessenen Gesamtdruckwerte sind den Tabellen in Anhang 9.8 und 9.9 zu entnehmen. Die Tabellen beinhalten sämtliche Werte, die zur Berechnung der Strömungsgeschwindigkeit und anschließenden graphischen Darstellung als Geschwindigkeitsvektoren erforderlich sind. Es wird deutlich, dass an zahlreichen Messpositionen eine Druckwertaufnahme nicht möglich ist. Die Buchstaben w, p, t und m geben an, aus welchem Grund (w Wölbung der Mahlkammer, p L-förmige Krümmung

des Pitot-Rohres, t Tauchrohr, m Mahlkammerwand) eine Gesamtdruckmessung nicht erfolgen kann. Die grau unterlegten Messwerte geben den höchsten aufgezeichneten Gesamtdruckwert an und werden zur Berechnung der Geschwindigkeit herangezogen. Tabelle 5-14 listet die notwendigen Kenngrößen für den maximal auftretenden Druckwert auf, um an diesem Beispiel die einzelnen Parameter zu erläutern:

Position 4	
tatsächlicher Radius [mm]	37,3
absolute Eintauchtiefe [mm]	9,1
Auswertungsebene [-]	(+1)
Anströmwinkel [°]	-5
absolute Richtung [°]	190
Statischer Druck [hPa]	350,4
Gesamtdruck [hPa]	898
Geschwindigkeit [m/s]	248
Temperatur [°C]	21,0

Tabelle 5-14: zur Berechnung der Geschwindigkeit notwendige Parameter, gemessen auf dem Radius 35,5 mm, Eintauchtiefe des Pitot-Rohres 6 mm, Anströmwinkel -5°

Der tatsächliche Radius gibt die Entfernung der Spitze des Pitot-Rohres vom Mahlkammermittelpunkt an.

Die absolute Eintauchtiefe bezeichnet den senkrechten Abstand der Tangente an den höchsten Punkt der Mahlkammer zur Ebene durch den jeweiligen Messpunkt bei einer bestimmten Eintauchtiefe des Pitot-Rohres. Um den Wölbungsradius der Mahlkammer von $R = 230\ mm$ an dieser Messposition zu berücksichtigen, wird die allgemeine Kreisgleichung 5.1 herangezogen:

$$f(x) = \sqrt{R^2 - x^2} \tag{5.1}$$

f(x) Funktionswert von x [mm]
R Wölbungsradius [mm]
x tatsächlicher Radius [mm]

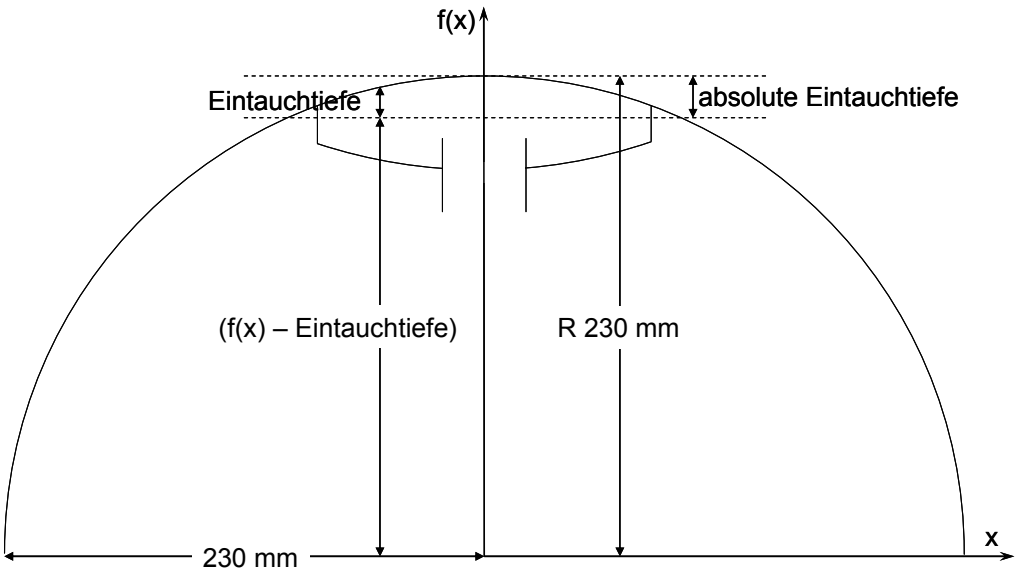


Abbildung 5-14: Skizze zur Berechnung der absoluten Eintauchtiefe aus der gemessenen Eintauchtiefe des Pitot-Rohres in die gewölbte Mahlkammer mit R = 230 mm

Wie aus Abbildung 5-14 hervorgeht, kann mit Gleichung 5.1 für den Wölbungsradius R der Mahlkammer der folgende Zusammenhang aufgestellt werden:

$$R - \text{absolute Eintauchtiefe} = f(x) - \text{Eintauchtiefe} \qquad (5.2)$$

Bei einer Eintauchtiefe des Pitot-Rohres von 6 mm berechnet sich die absolute Eintauchtiefe zu:

$$R + \text{Eintauchtiefe} - \sqrt{R^2 - x^2} =$$
$$230\,\text{mm} + 6\ \text{mm} - \sqrt{(230\ \text{mm})^2 - (37{,}3\,\text{mm})^2} = 9{,}1\ \text{mm}$$

Entsprechend den in der nachfolgenden Tabelle 5-15 angegebenen Bereichen für die absolute Eintauchtiefe des Pitot-Rohres lassen sich verschiedene Auswertungsebenen in der Mahlkammer einteilen:

absolute Eintauchtiefe [mm]	Auswertungs-ebene [-]
3,5 - 4,4	(+6)
4,5 - 5,4	(+5)
5,5 - 6,4	(+4)
6,5 - 7,4	(+3)
7,5 - 8,4	(+2)
8,5 - 9,4	(+1)
9,5 - 10,4	(-1)
10,5 - 11,4	(-2)
11,5 - 12,4	(-3)
12,5 - 13,4	(-4)
13,5 - 14,4	(-5)
14,5 - 15,4	(-6)
15,5 - 16,4	(-7)
16,5 - 17,4	(-8)

Tabelle 5-15: Absolute Eintauchtiefen des Pitot-Rohres mit zugeordneten Auswertungsebenen

Die durch die Mittelpunkte der Treibstrahldüsen aufgespannte Ebene (0) wird als Bezugsebene gewählt. Mit Hilfe der Gleichung 5.1 sowie weiteren Abmessungen, die Abbildung 5-15 zu entnehmen sind, ermittelt sich für diese Ebene ein Abstand von 9,5 mm zur Tangente an den höchsten Punkt der Mahlkammer. Die Auswertungsebenen erstrecken sich über einen Bereich von 1 mm Dicke oberhalb bzw. unterhalb der Bezugsebene (0). Um ein mögliches symmetrisches Strömungsverhalten genauer zu betrachten, werden die sich weiter anschließenden Ebenen mit (+) für oberhalb und (-) für unterhalb der Bezugsebene unter fortlaufender Nummerierung gekennzeichnet.

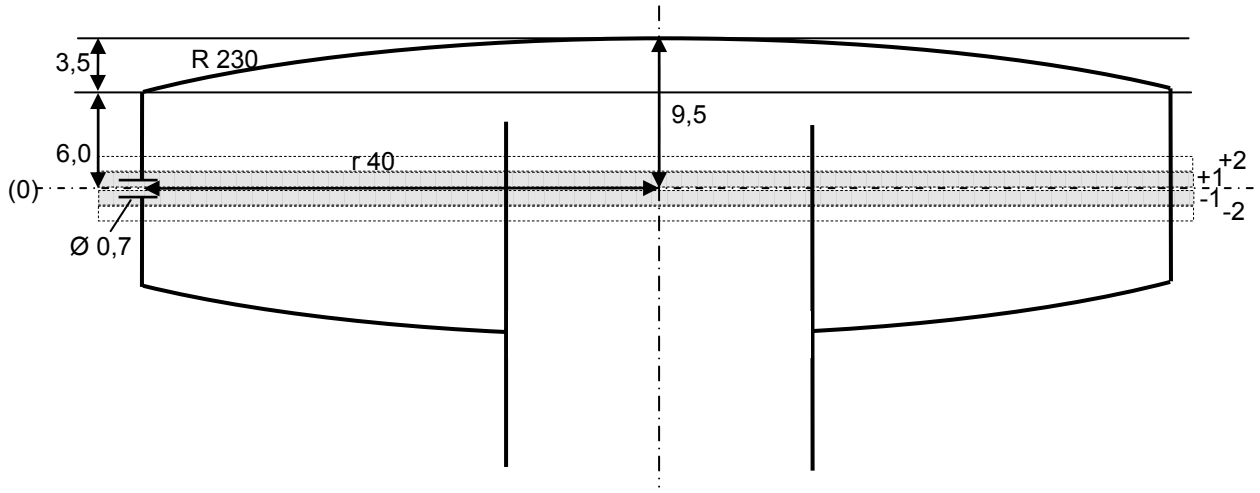


Abbildung 5-15: Skizze der Mahlkammer mit Bezugsebene (0) und den ersten sich anschließenden Auswertungs-ebenen

Der Anströmwinkel von -5° gibt den gemessenen Winkel der Spitze des Pitot-Rohres zur Bohrung bei maximaler Anströmung an.
Abbildung 5-16 dient zur Darstellung der absoluten Richtung (+190°), in die das Pitot-Rohr bei optimaler Anströmung zeigt. Die Null-Linie wird dabei als Parallele zur vertikalen Symmetrieachse der Mahlkammer festgelegt.

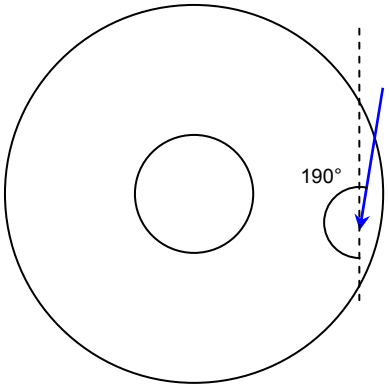


Abbildung 5-16: Darstellung der absoluten Richtung eines Geschwindigkeitsvektors in der Mahlkammer

Der statische Druck wird über die Funktionsgleichungen aus Tabelle 5-4 berechnet, die für den Messpunkt auf dem tatsächlichen Radius gelten. Die für den Definitionsbereich von [40,0 ; 13,0] mm angegebene Gleichung $y = 10{,}025 \cdot x - 23{,}874$ liefert mit x gleich dem tatsächlichen Winkel einen statischen Druck von 350,4 hPa.
Die Berechnung der Geschwindigkeit von 248 m/s mit $\kappa = 1{,}405$, $R_L = 287{,}22$ [J/(kg K)] und dem bei einer Temperatur (T = 273,15 + Temperatur bei der Messung) [K] gemessenen Gesamtdruck erfolgt nach den Gleichungen 2.9 und 2.18.

$$v = \sqrt{\frac{2}{\kappa - 1}\left[\left(\frac{p_{ges}}{p_{stat}}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1\right]} \cdot \sqrt{\kappa R_L T}$$

$$= \sqrt{\frac{2}{1{,}405 - 1}\left[\left(\frac{191100\ \text{Pa}}{136339\ \text{Pa}}\right)^{\frac{1{,}405-1}{1{,}405}} - 1\right]} \cdot \sqrt{1{,}405 \cdot 287{,}22\ \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2\ \text{K}} \cdot 294{,}15\ \text{K}} = 248\ \text{m/s}.$$

Dazu müssen zu statischen und Gesamtdruckwerten jeweils 1013 hPa Atmosphärendruck addiert werden, da jeweils mit Absolutdrücken in der SI-Einheit Pascal zu rechnen ist.

5.3.5 Strömungsprofile

Zum erleichterten Überblick über die zahlreichen Messdaten, siehe Anhang 9.8 und 9.9, erfolgt eine graphische Auswertung der Messergebnisse. Da es nicht sinnvoll ist, diese Werte in vielen Einzelgraphiken abzubilden, bietet sich eine Profildarstellung der Strömungsgeschwindigkeiten an. Gängige Graphikprogramme reichen für diesen Zweck nicht aus, so dass für die Visualisierung auf das Programm MATLAB® [45] zurückgegriffen wird, der dafür benötigte Programmiercode ist in Anhang 9.7 beschrieben. Auf diese Weise kann der Verlauf einzelner Strömungsvektoren angegeben werden. Die Spitze des Vektorpfeils deutet dabei auf den Punkt, an dem mittels Pitot-Rohr Richtung und Geschwindigkeit der Strömung bestimmt wird. An Hand der Farbskala und Länge des Pfeils lässt sich direkt der Geschwindigkeitswert ablesen. Es werden nur Geschwindigkeiten über 30 m/s abgebildet. Zur erleichterten Übersicht wird der Durchmesser der Mahlkammer von 80 mm im Maßstab 2:1 abgebildet. Die gestrichelten Linien stellen zum einen die Symmetrieachsen der Mahlkammer dar, zum anderen auch die Richtung der aus den Düsen unter einem Winkel von 54° austretenden Treibstrahlen. Um die Wölbung des Mahlkammerdeckels an jedem Messpunkt bei der Geschwindigkeitsberechnung zu berücksichtigen, erfolgt die Auswertung der Gesamtdruckwerte nicht nach der gemessenen Eintauchtiefe des Pitot-Rohres, sondern geordnet nach einzelnen Auswertungsebenen, vgl. Tabelle und Abbildung 5-15. Die durch die Mittelpunkte der Düsen aufgespannte Ebene dient dazu als Symmetrieachse.

5.3.5.1 Strömungsverlauf in den Treibstrahlebenen (+1) und (-1)

Wird das Pitot-Rohr auf dem Radius 35,5 mm 6 bzw. 7 mm tief in der Mahlkammer positioniert, lassen sich deutlich erhöhte Gesamtdruckwerte feststellen. Dieser Effekt ist auf das Erreichen der Treibstrahlebenen (+1) und (-1) zurückzuführen, da hier der Einfluss der Düsen dominierend ist. Durch diese werden Messungen nur auf dem äußeren Radius der Mahlkammer stark beeinflusst, wie die Strömungsprofile in den Abbildungen 5-17 sowie 5-18 erkennen lassen. Abhängig von der Messposition beträgt die Strömungsgeschwindigkeit in der Ebene (+1) am peripheren Umfang der Mahlkammer bis zu 248 m/s. Mit zunehmender Entfernung der Messposition von der Treibstrahldüse fällt die Geschwindigkeit auf gleichem Radius bis auf ungefähr 95 m/s ab. In der Ebene (-1) treten ebenfalls hohe Strömungsgeschwindigkeiten von teilweise 217 m/s auf, die je nach Messposition auf diesem Radius bis auf 90 m/s absinken. Die ermittelten Geschwindigkeiten der Ebenen (+1) und (-1) wurden bereits in Abhängigkeit von der Position des Pitot-Rohres auf dem Radius 35,5 mm in Kapitel 5.3.3 ausführlich erläutert.

Zur weiteren Erklärung des Strömungsverlaufs ist es notwendig, die bereits in Kapitel 2.3.1 erläuterte Differenzierung zwischen Zerkleinerungs- und Sichtzone mit in die Betrachtung einzubeziehen. In der Zerkleinerungszone an der Mahlkammerperipherie sind in beiden Ebenen hohe Geschwindigkeiten zu erkennen. Durch Messungen auf dem Radius 26,5 mm lassen sich für die zirkulierende Grundströmung Geschwindigkeiten zwischen 50 und 95 m/s ermitteln. In der Sichtzone dagegen treten erhöhte Werte um 115 m/s auf. Bedingt durch den zur Abscheidung erforderlichen Sog in das Tauchrohr hinein nimmt die Geschwindigkeit in diesem Bereich wieder zu. Die radiale Komponente des Strömungsvektors vergrößert sich, wie es typisch für eine Spiralströmung ist.

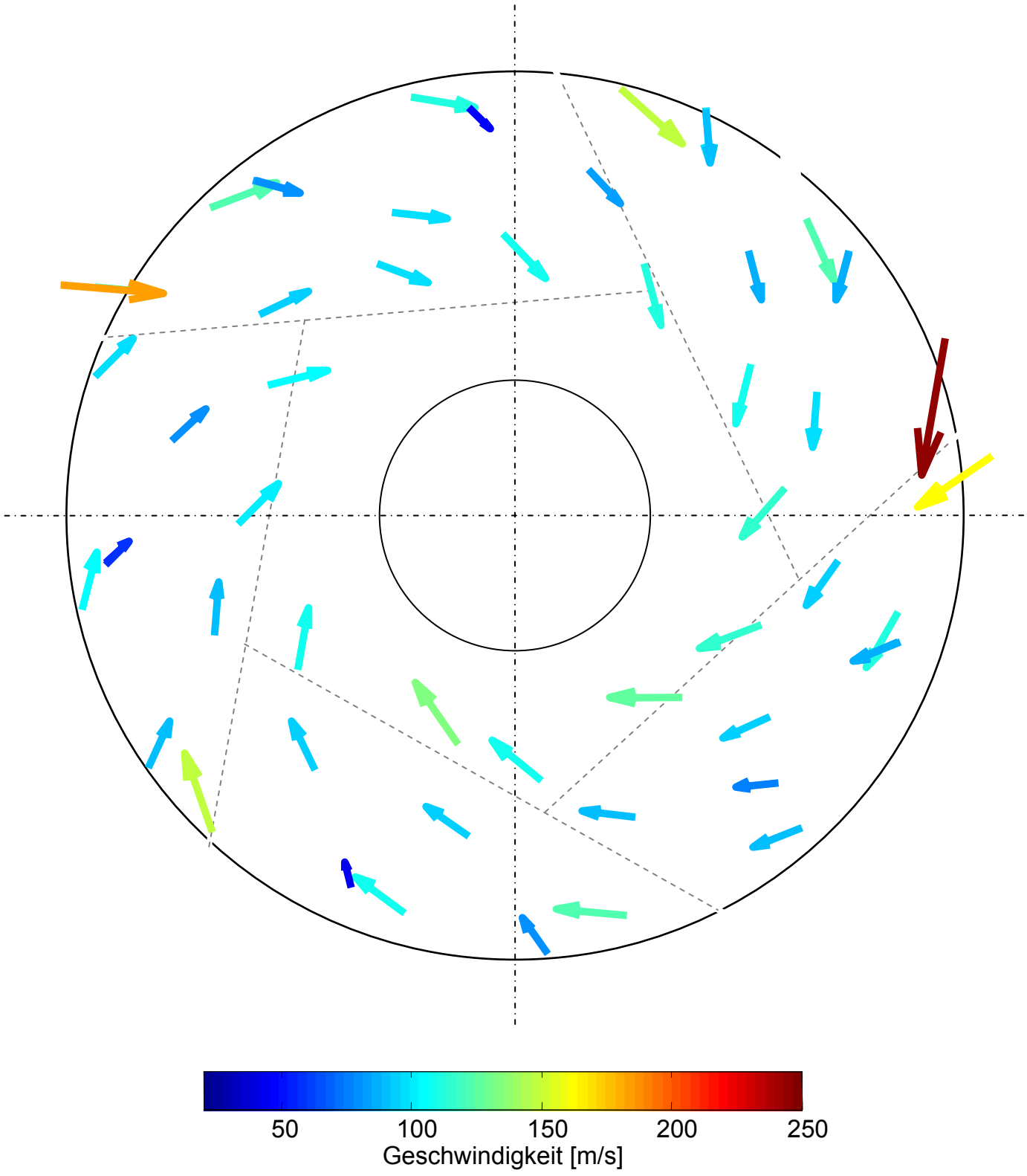


Abbildung 5-17: Strömungsverlauf in Ebene (+1)

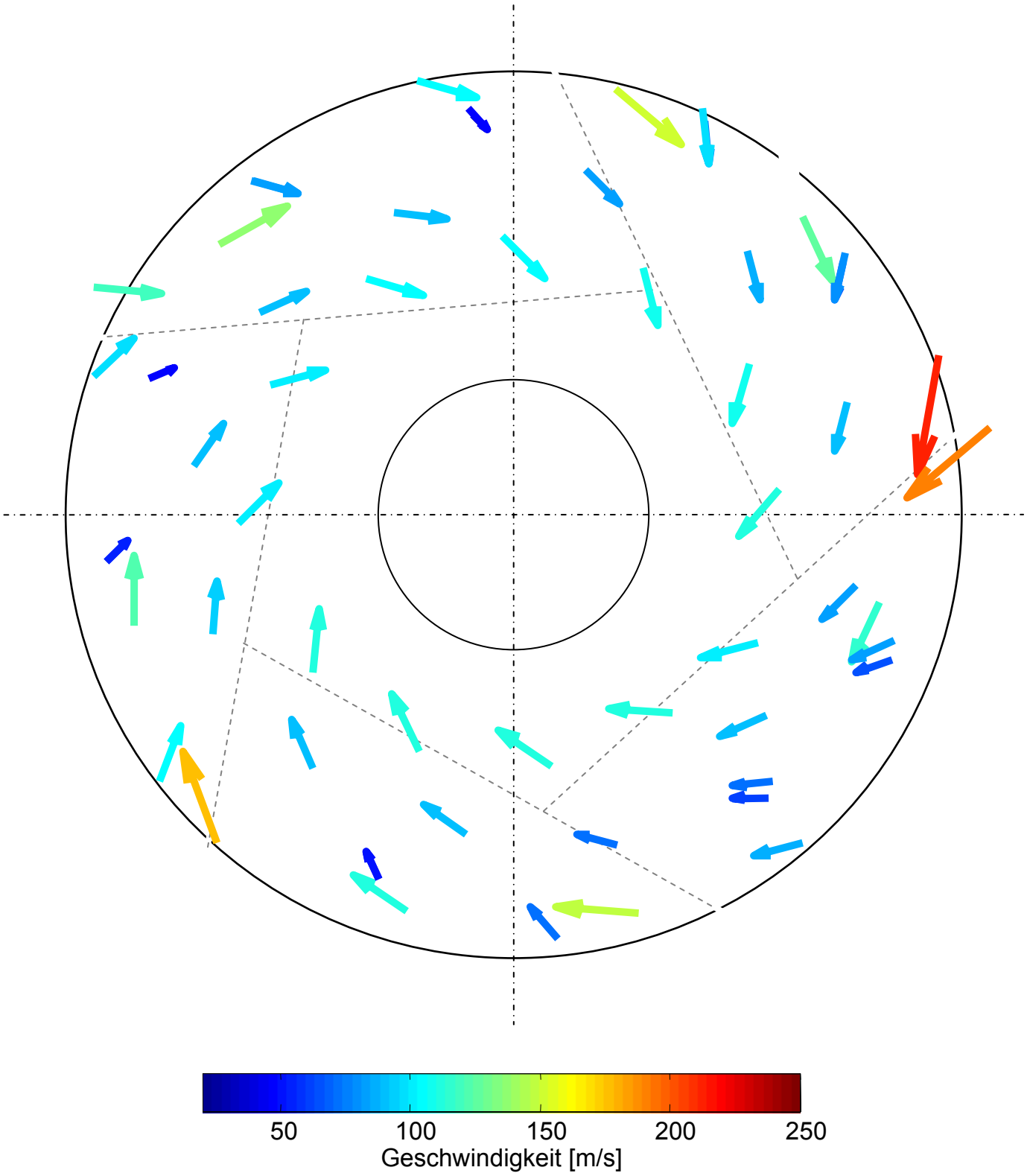


Abbildung 5-18: Strömungsverlauf in Ebene (-1)

5.3.5.2 Strömungsverlauf in den Ebenen 2, 3 und 4

5.3.5.2.1 Strömungsverlauf in den Ebenen (+2), (+3) und (+4) oberhalb der Treibstrahlen

In den Bereichen oberhalb der Treibstrahlen lässt sich die Strömung auf Grund ihres gleichartigen Verlaufs für die Ebenen (+2) bis (+4) zusammenfassen. Hier kann der Gesamtdruck auf Positionen bis zu Radien von 17,0 mm gemessen werden. Auf Grund der Begrenzung durch das nahe Tauchrohr lassen sich nur Geschwindigkeiten bei Anströmwinkeln des Pitot-Rohres um -320° berechnen. In den Strömungsprofilen der nachfolgenden drei Ebenen (+2), (+3) und (+4) oberhalb der Treibstrahlen, vgl. Abbildungen 5-19 bis 5-21, zeigen die Vektoren ab dem Radius 26,5 mm mit großer Radialkomponente nach innen, resultierend aus dem steileren Anströmwinkel des Pitot-Rohres. Die Geschwindigkeit beträgt in diesem Bereich 50 bis 87 m/s. Eine genauere Betrachtung der Besonderheit der Strömungsverläufe auf dem Radius r = 26,5 mm folgt in Kapitel 5.3.5.5. In der Sichtzone treten in den betrachteten Ebenen (+2), (+3) und (+4) erhöhte Geschwindigkeiten auf, die von 107 bis 133 m/s reichen. Der Strömungsverlauf der Ebene (+2) zeigt deutlich, dass die Strömung auf dem peripheren Radius von 35,5 mm entlang des Umfangs der Mahlkammer verläuft. Dabei werden Geschwindigkeiten bis zu 129 m/s erreicht. In der höhergelegenen Ebene (+3) fallen die ermittelten Geschwindigkeiten auf diesem Radius bis auf 111 m/s. Bedingt durch die Wölbung des Mahlkammerdeckels ist eine Messwerterfassung auf dem äußeren Radius in der Ebene (+4) schon nicht mehr möglich.

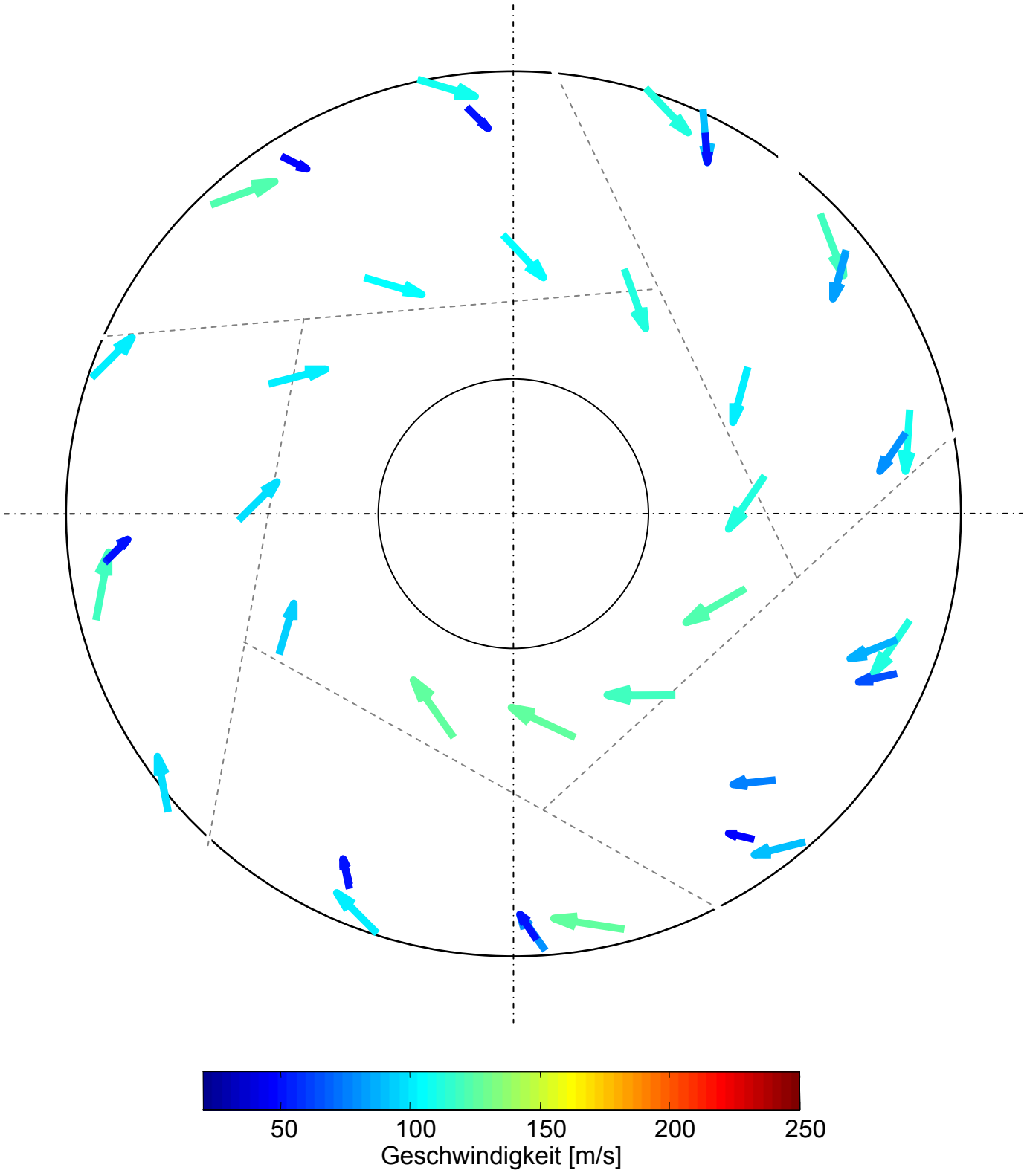


Abbildung 5-19: Strömungsverlauf in Ebene (+2)

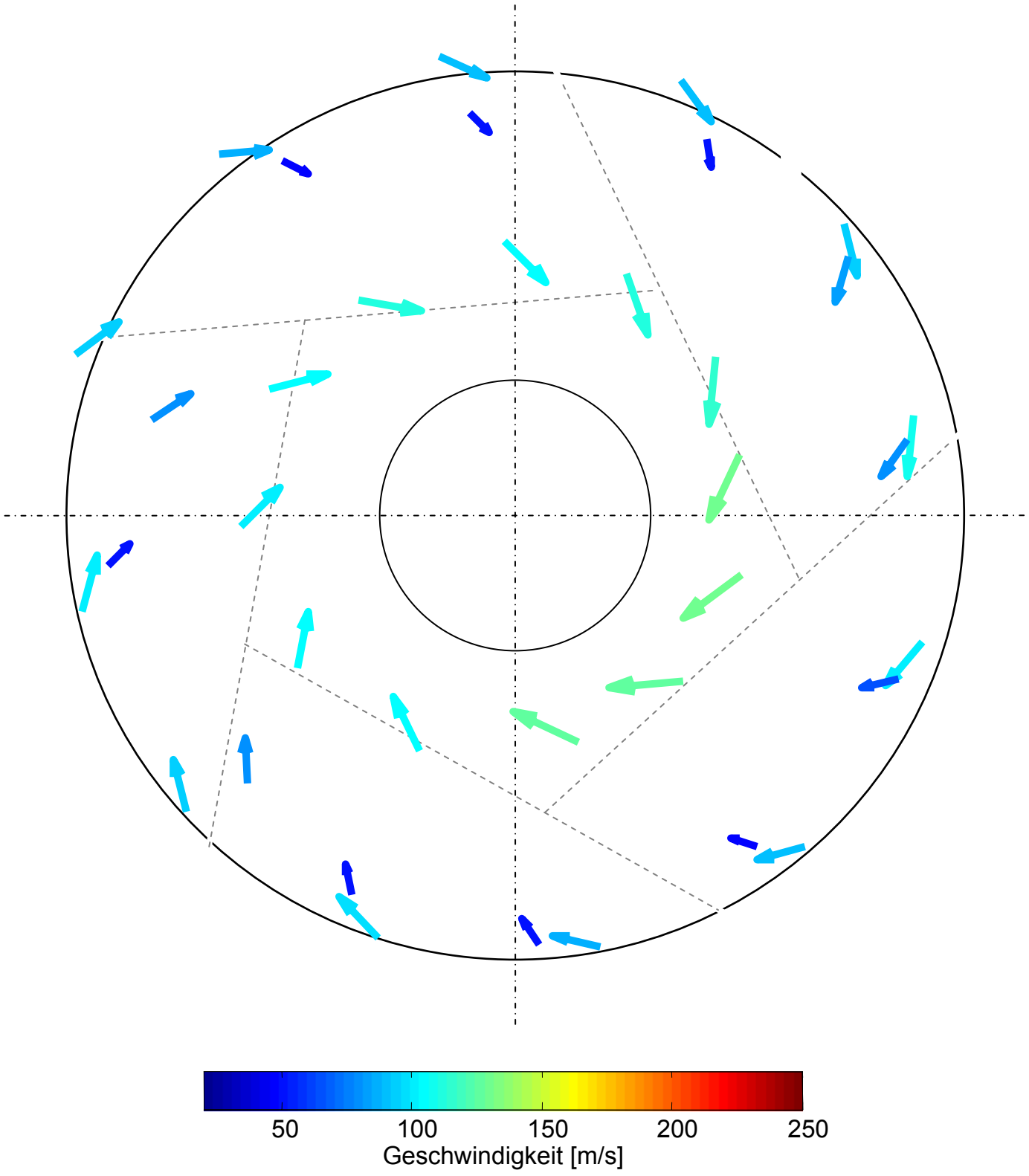


Abbildung 5-20: Strömungsverlauf in Ebene (+3)

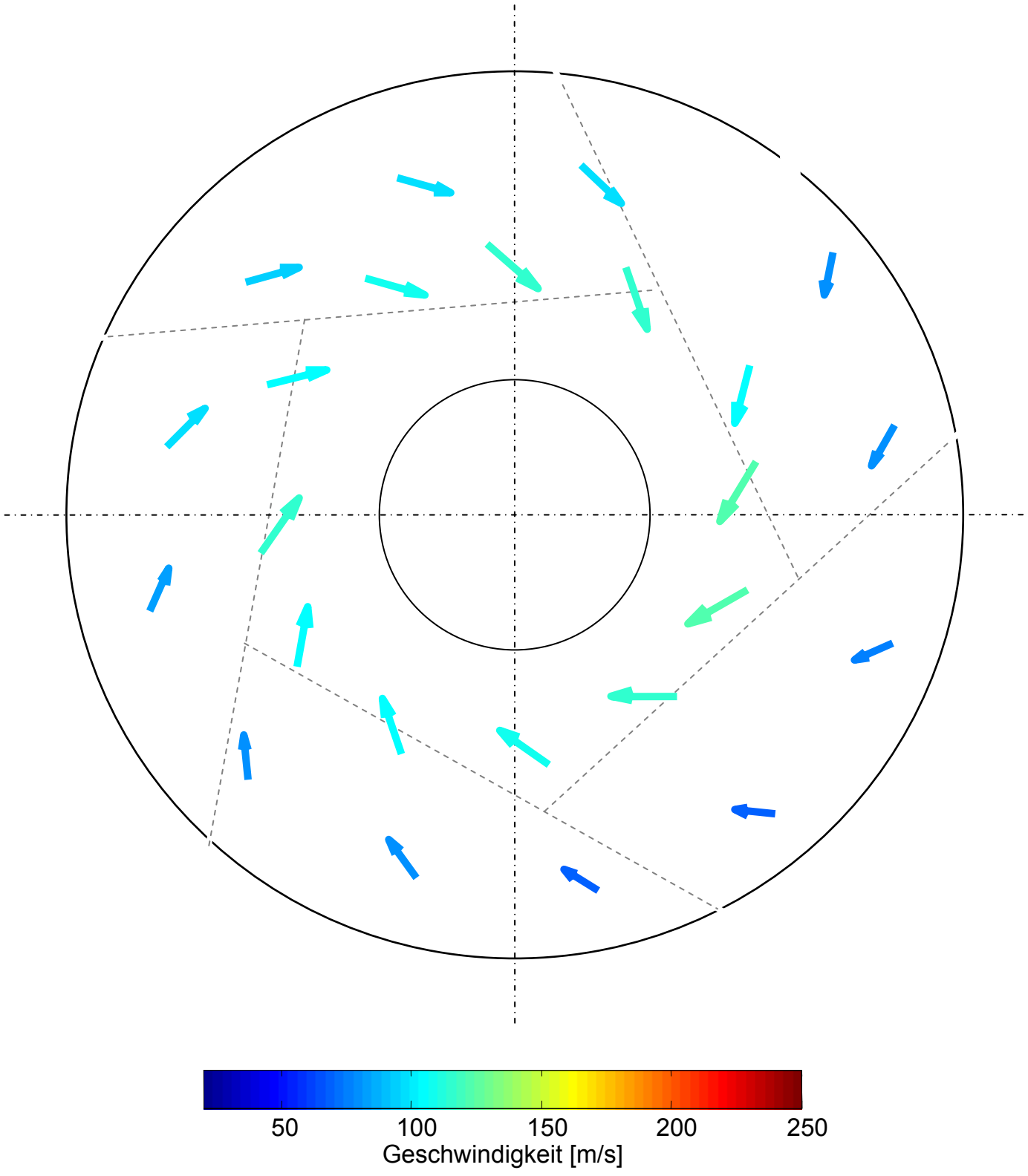


Abbildung 5-21: Strömungsverlauf in Ebene (+4)

5.3.5.2.2 Strömungsverlauf in den Ebenen (-2), (-3) und (-4) unterhalb der Treibstrahlen

Der Bereich direkt unterhalb der Treibstrahlen umfasst ebenfalls auf Grund gleichartiger Strömungseigenschaften die Ebenen (-2), (-3) und (-4), siehe auch Abbildungen 5-22 bis 5-24. Es fällt sofort auf, dass am peripheren Mahlkammerradius von 35,5 mm die Geschwindigkeit der Strömung langsam auf 90 bis 100 m/s abnimmt. Nur noch vereinzelt werden Werte von 140 m/s erreicht. Die ermittelten Geschwindigkeiten der Grundströmung betragen ca. 72 m/s. In diesen betrachteten Ebenen sind die Geschwindigkeiten in der Sichtzone höher als die der umlaufenden Strömung und liegen bei durchschnittlich 100 m/s, wie es für eine Spiralströmung typisch ist.

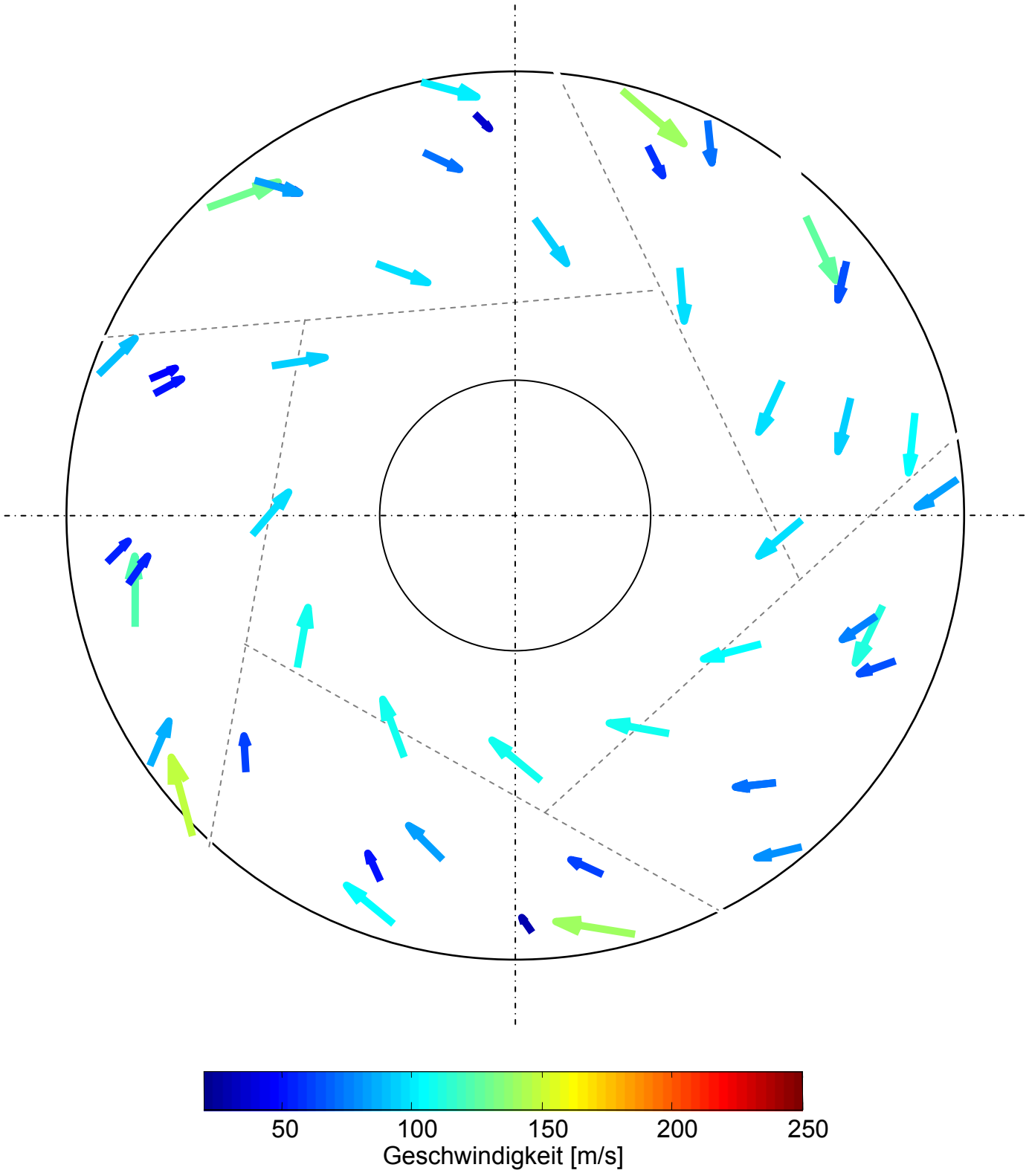


Abbildung 5-22: Strömungsverlauf in Ebene (-2)

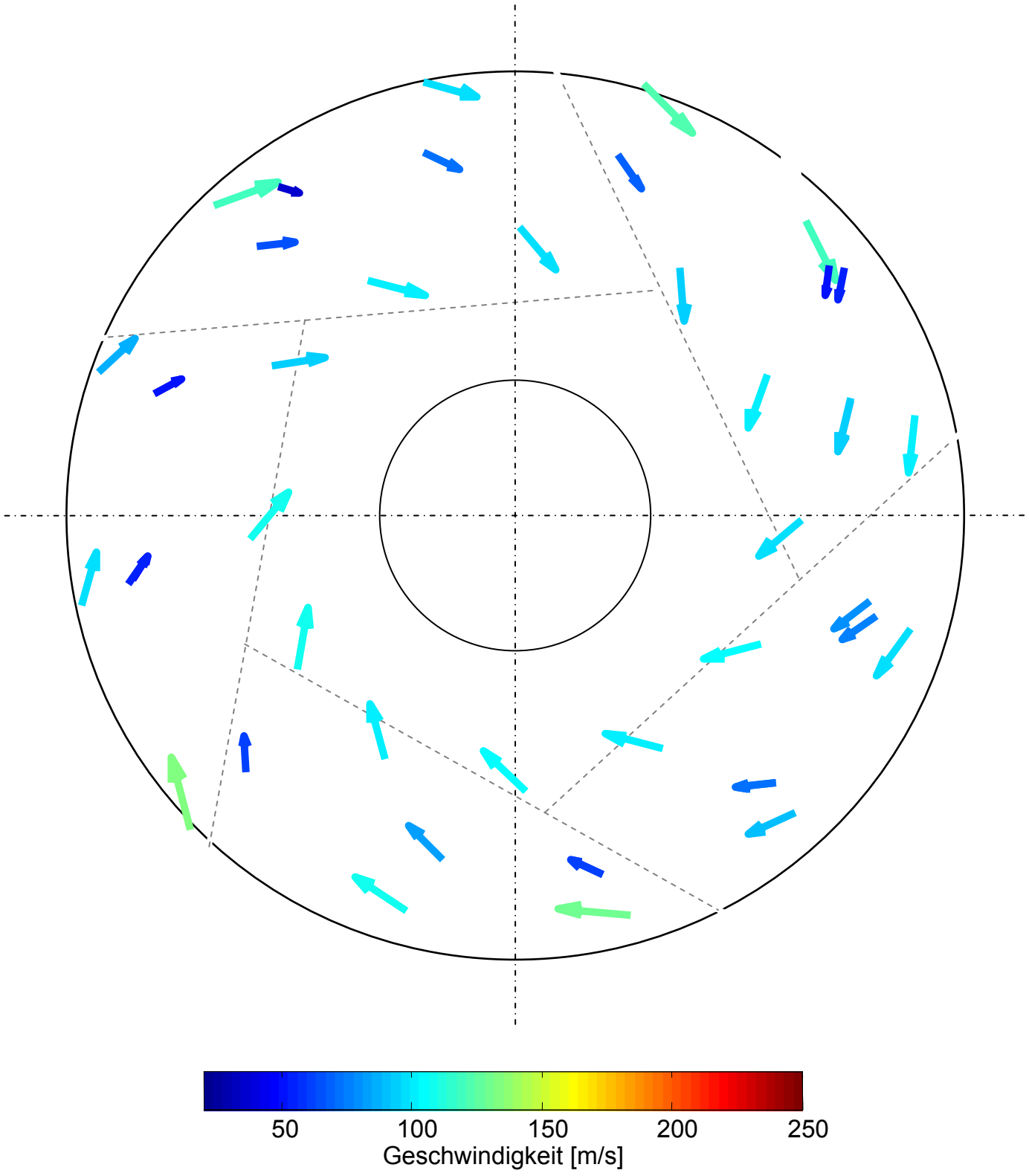


Abbildung 5-23: Strömungsverlauf in Ebene (-3)

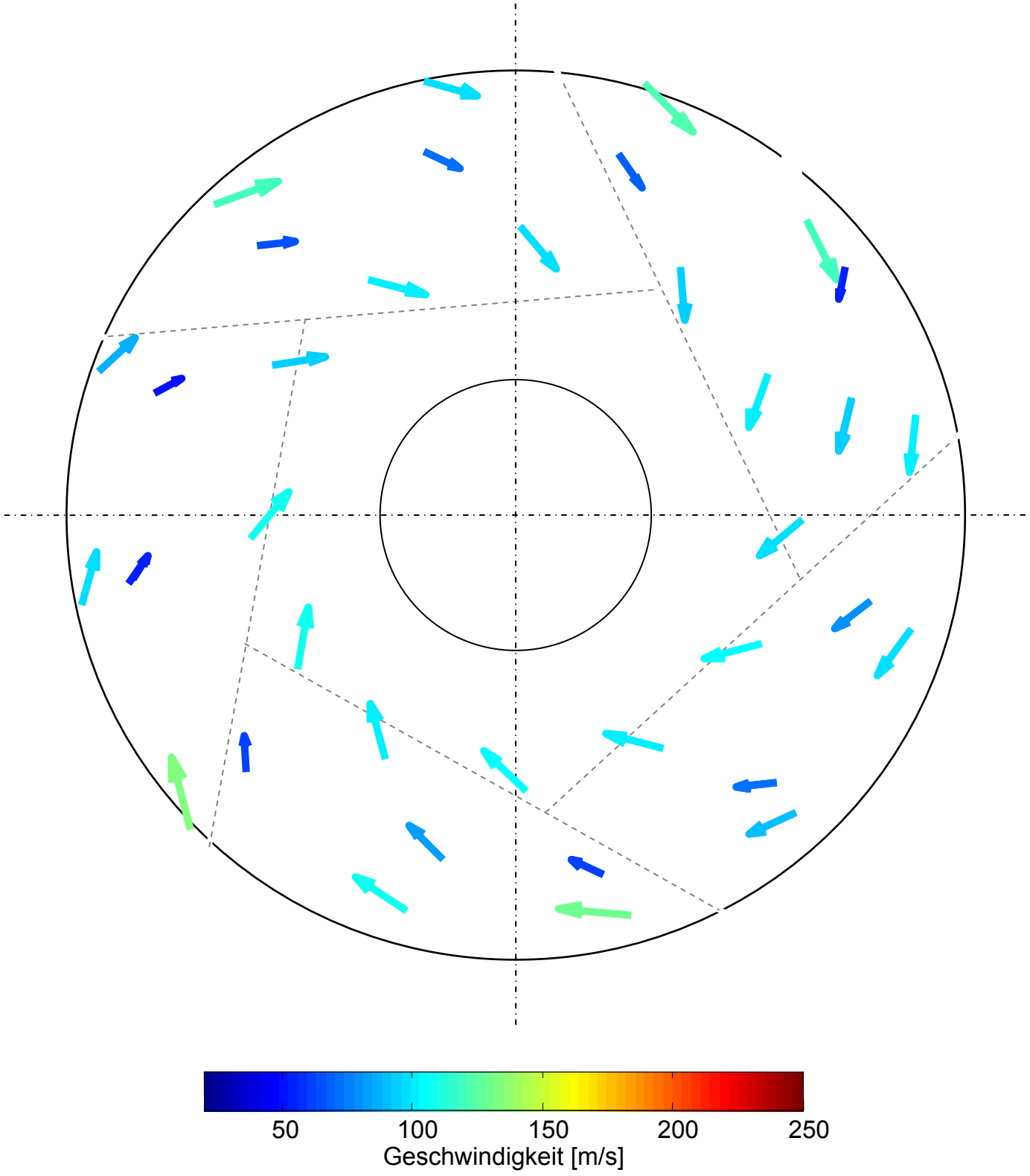


Abbildung 5-24: Strömungsverlauf in Ebene (-4)

5.3.5.3 Strömungsverlauf in den Ebenen 5, 6, 7 und 8

5.3.5.3.1 Strömungsverlauf in den oberen Ebenen (+5) und (+6) der Mahlkammer

In diesem Kapitel werden die beiden oberen Ebenen der Mahlkammer beschrieben. Auf Grund der L-förmigen Krümmung des Pitot-Rohres sowie der Wölbung des Mahlkammerdeckels ist es nicht möglich, Gesamtdruckwerte in den Ebenen (+7) und (+8) aufzunehmen.

Die Geschwindigkeitsvektoren der Ebene (+5) weisen in ihrem gleichartigen Strömungsverlauf stark in Richtung des Abscheiderohres. Auf dem Radius von r = 26,5 mm treten zusätzlich noch Vektoren auf, die Geschwindigkeiten von ca. 80 bis 100 m/s und Richtung der zirkulierenden Grundströmung anzeigen. Das Profil der nachfolgenden Ebene (+6) stellt Strömungsvektoren in der Mitte der Mahlkammer mit Geschwindigkeiten von 30 bis 142 m/s dar. Fast alle diese Vektoren treten innerhalb der Sichtzone auf und weisen in ihrer Richtung deutlich nach innen zum Tauchrohr. Eine Strömung entlang des Umfangs der Mahlkammer kann auf Grund der Messanordnung nicht mehr beobachtet werden. Ferner fällt auf, dass vermehrte Strömungspfeile in der oberen Hälfte des Ebenenbildes auftreten. Die Erklärung hierfür ist in der nicht exakt gleichmäßigen Ausformung der Deckelwölbung zu sehen, bei der Abweichungen des Wölbungsradius von ungefähr ± 0,5 mm auftreten können.

Zusammenfassend kann für die betrachteten Ebenen festgestellt werden, dass die Strömung in einer Spirale in Richtung des Tauchrohres fließt. Die Geschwindigkeiten innerhalb der Sichtzone sind im Vergleich zur umlaufenden Grundströmung leicht erhöht.

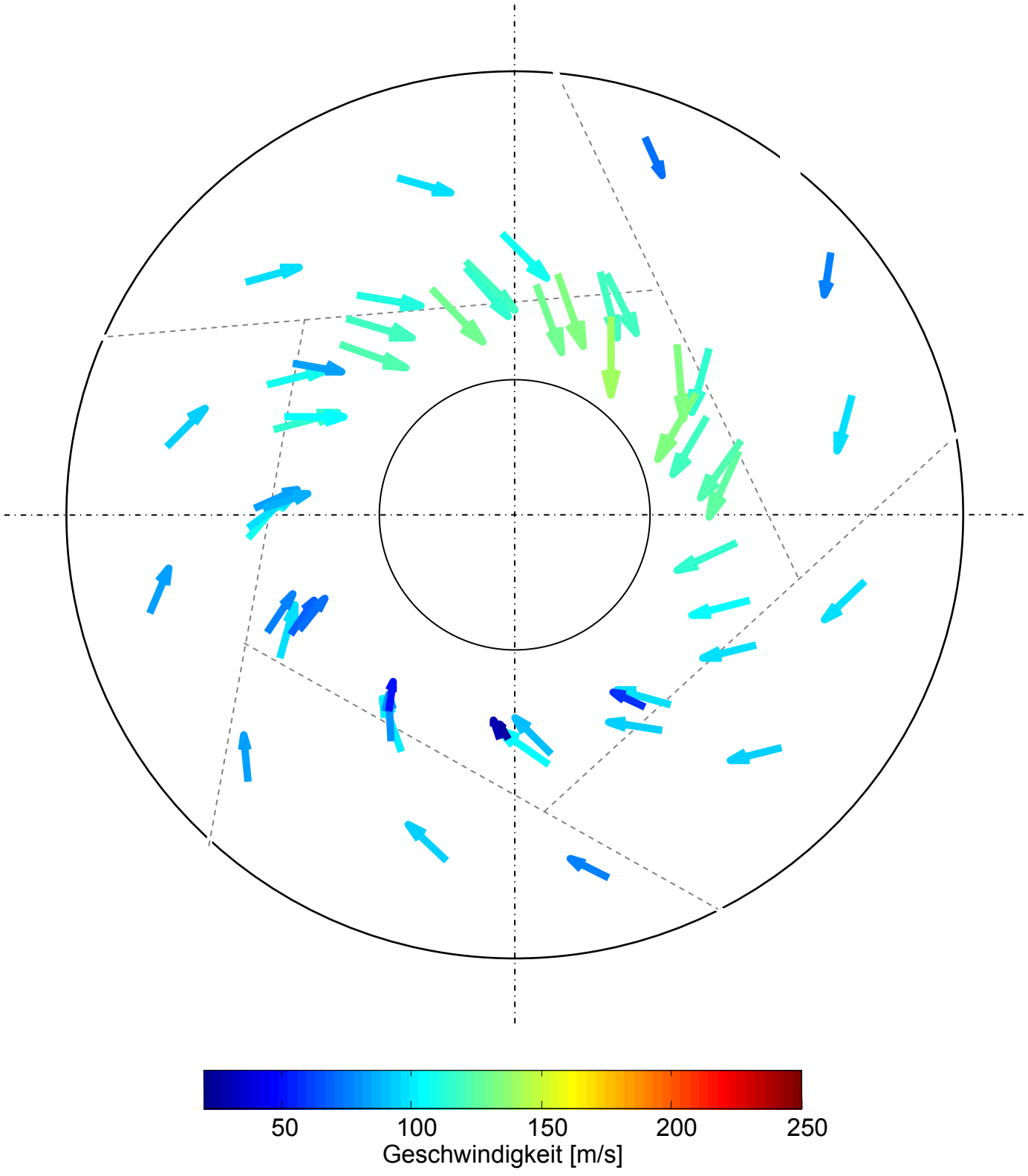


Abbildung 5-25: Strömungsverlauf in Ebene (+5)

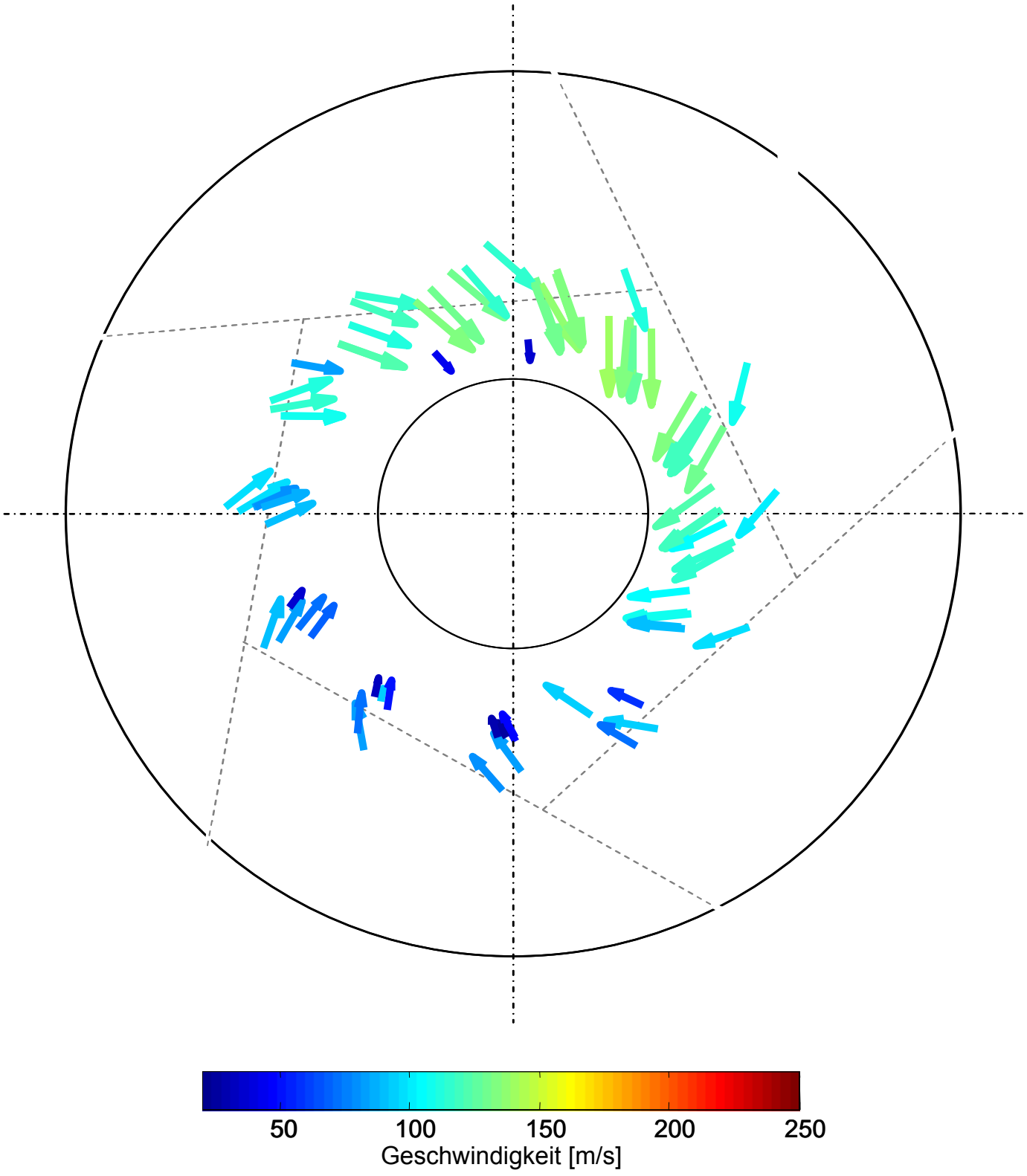


Abbildung 5-26: Strömungsverlauf in Ebene (+6)

5.3.5.3.2 Strömungsverlauf in den Ebenen (-5), (-6), (-7) und (-8) über der Bodenfläche der Mahlkammer

Der Strömungsverlauf in Bereichen über dem Boden der Mahlkammer lässt sich durch einen Übergangsbereich deutlich von den Ebenen unterhalb der Treibstrahlen abgrenzen. In dieser Übergangsebene (-5), siehe Abbildung 5-27, tritt am äußeren Umfang der Mahlkammer ein homogenes Geschwindigkeitsfeld auf, die Vektoren repräsentieren hier gleichmäßige Geschwindigkeiten von ungefähr 100 m/s. Bei kleineren Radien liegen die Vektoren wie erwartet zur Mitte zeigend in einem höheren Geschwindigkeitsbereich. In den drei unteren Ebenen (-6) bis (-8) oberhalb des Mahlkammerbodens, vgl. Abbildungen 5-28 bis 5-30, erfolgen die Messungen nur noch auf dem Radius 26,5 mm, so dass die Anzahl der Strömungsvektoren drastisch abnimmt. Eine Platzierung des Pitot-Rohres in der Peripherie sowie in der Sichtzone der Mahlkammer ist nicht mehr möglich. Auch die Geschwindigkeitswerte der Grundströmung werden auf ungefähr 75 m/s gemindert.

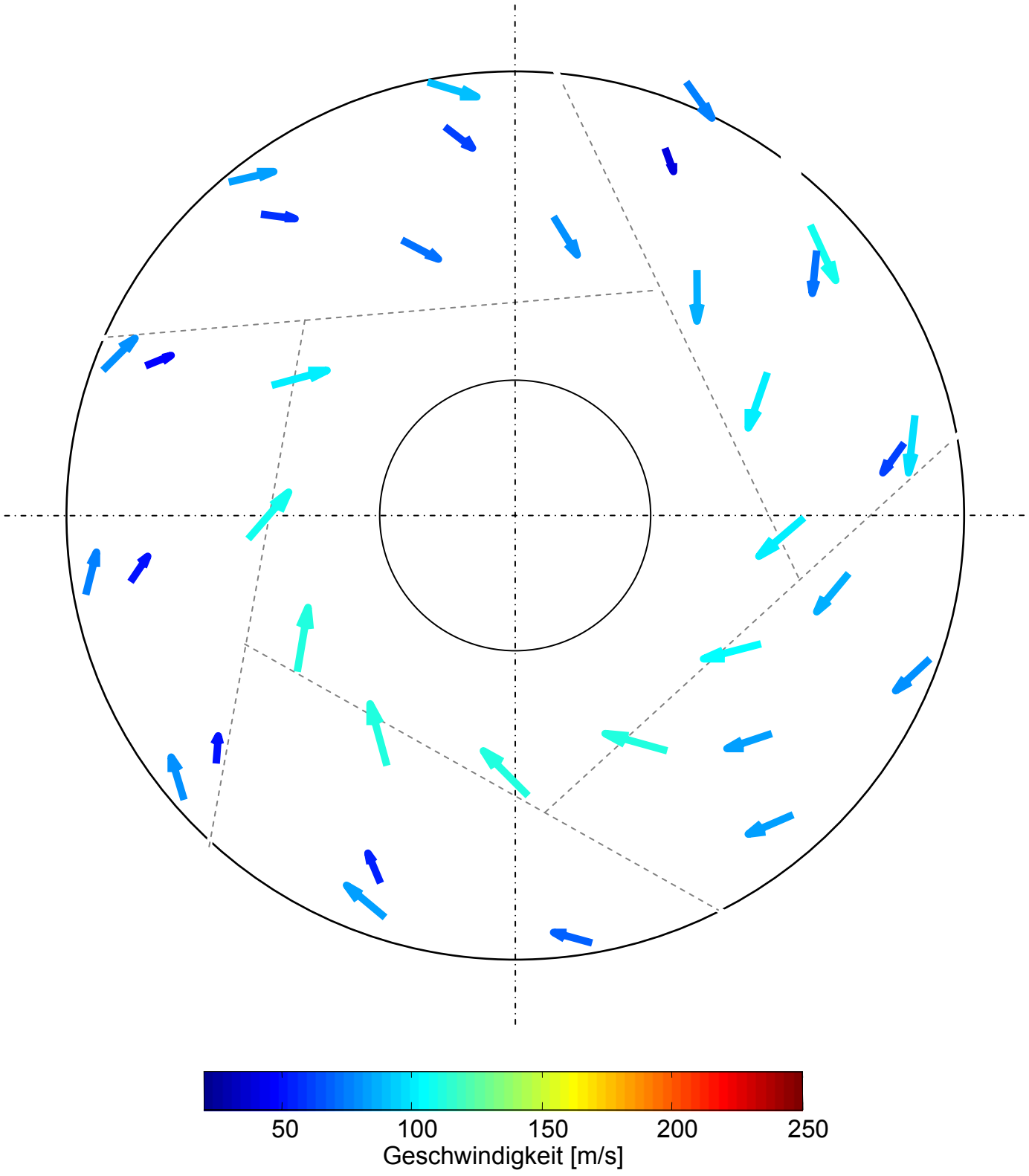


Abbildung 5-27: Strömungsverlauf in Ebene (-5)

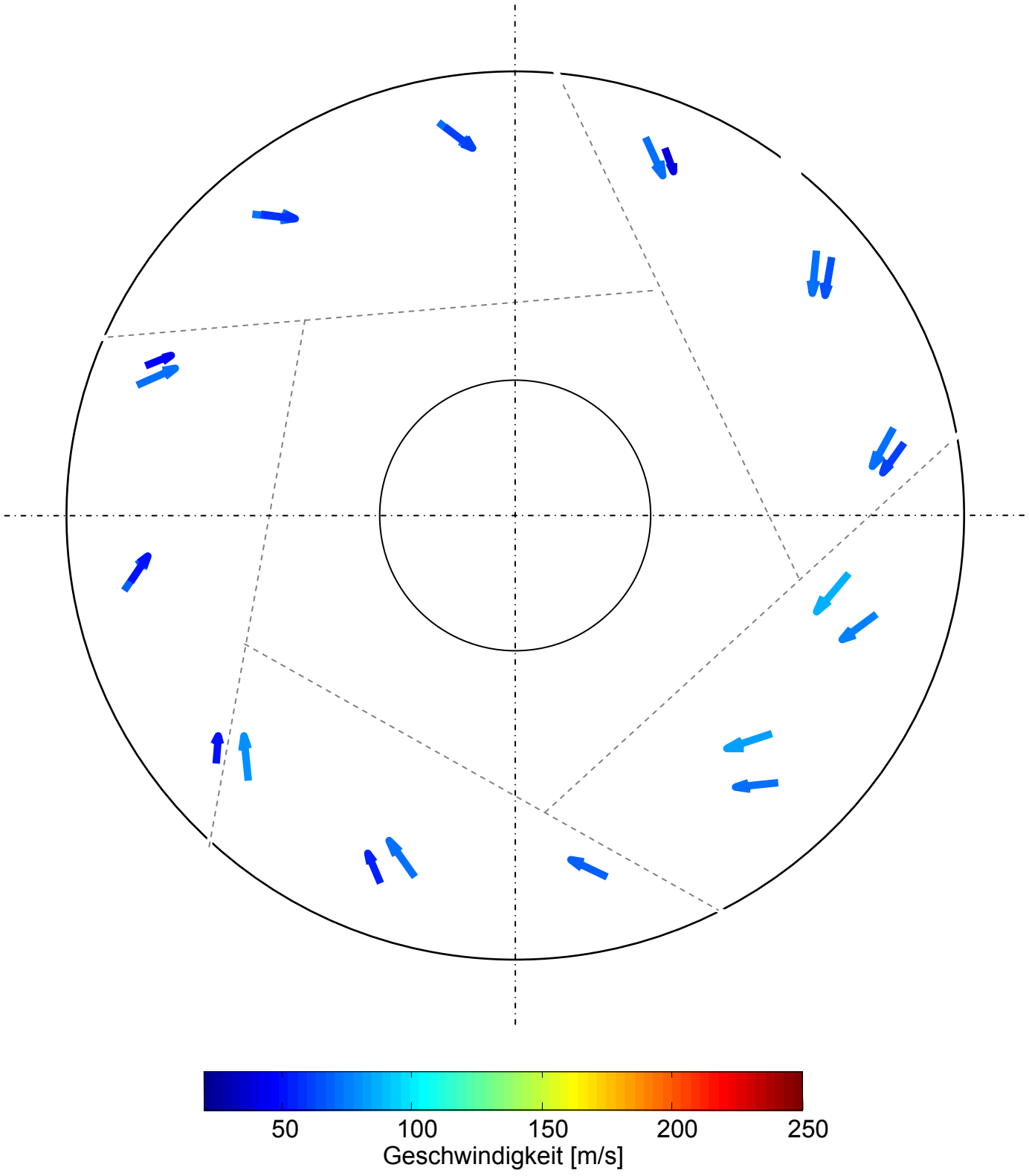


Abbildung 5-28: Strömungsverlauf in Ebene (-6)

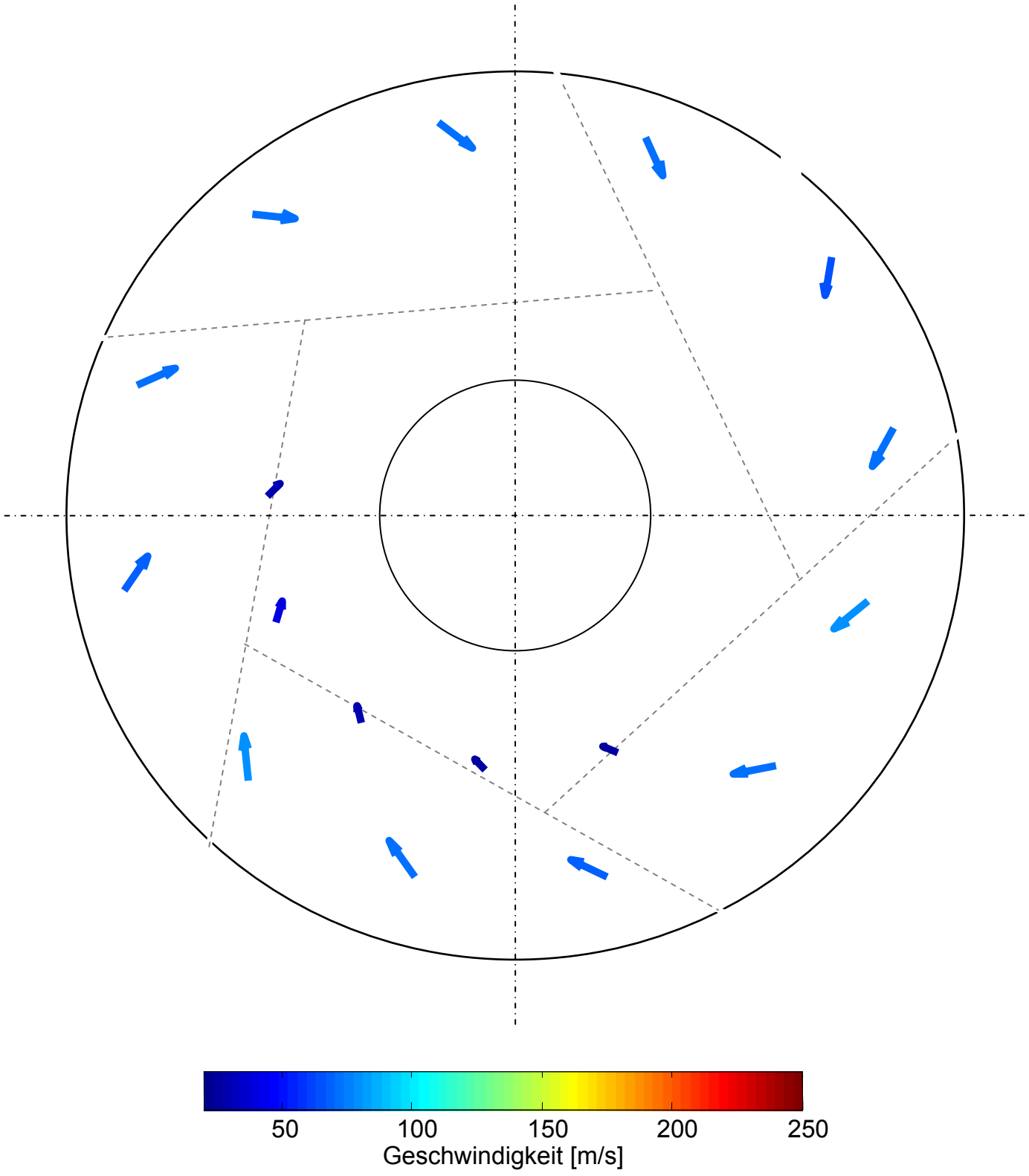


Abbildung 5-29: Strömungsverlauf in Ebene (-7)

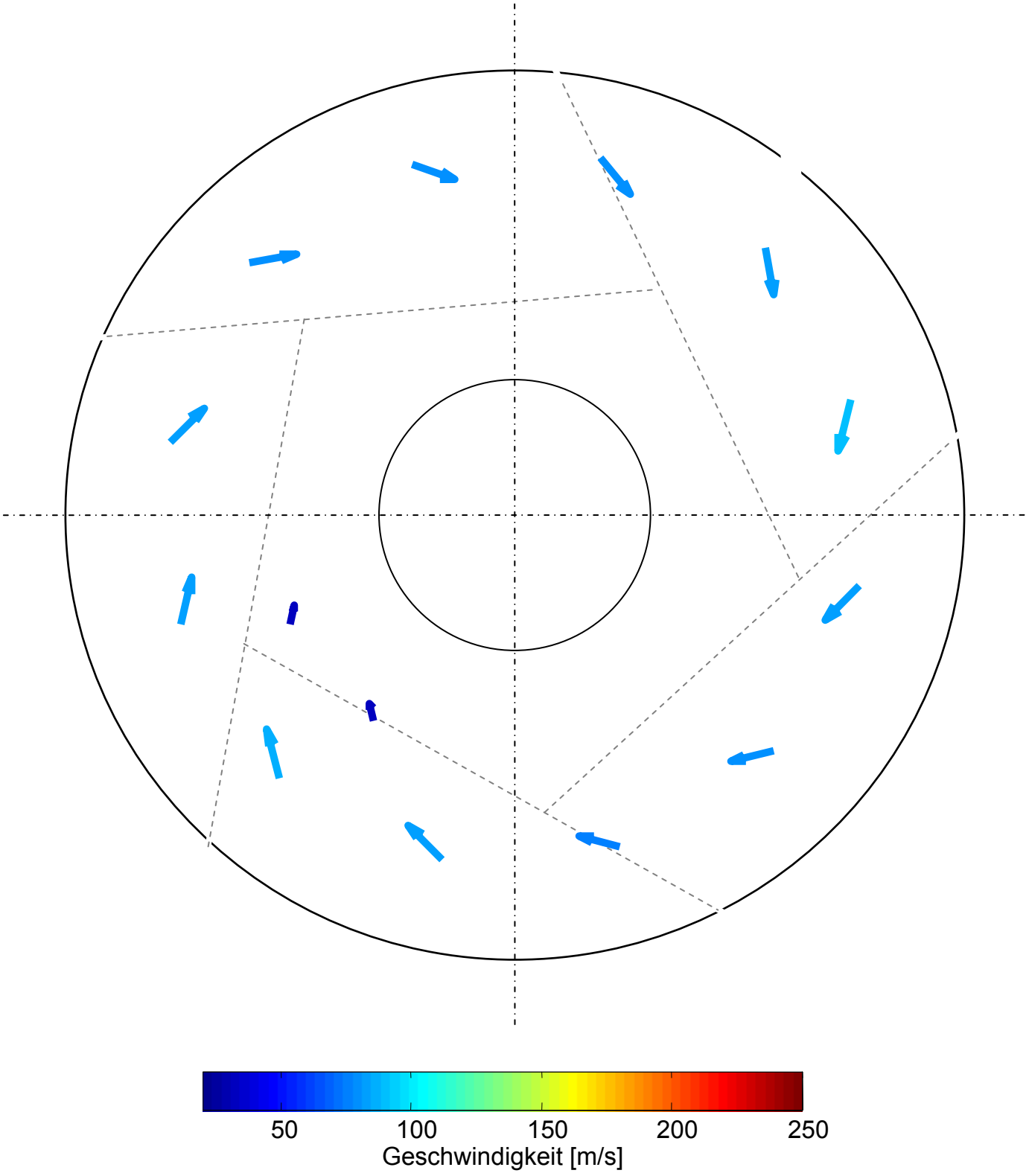


Abbildung 5-30: Strömungsverlauf in Ebene (-8)

5.3.5.4 Strömungsverlauf unterhalb des Mahlkammerdeckels

Für die Erfassung des Strömungsverlaufs entlang der Mahlkammerwölbung wird das Pitot-Rohr mit einer Eindringtiefe von 3 bzw. 4 mm auf dem jeweiligen Radius im Mahlkammerdeckel fixiert. Derartige Messungen lässt der gewählte Mahlspalt von 5 mm gerade noch zu. Innerhalb des Tauchrohres können Gesamtdruckwerte nur bis zu einem Radius von 9,0 mm aufgenommen und zur Berechnung der Geschwindigkeit herangezogen werden. Bei einer Positionierung des Pitot-Rohres auf Messpunkten, die sich fast am bzw. genau im Mittelpunkt der Mahlkammer befinden, sind die gemessenen Gesamtdruckwerte deutlich niedriger als der zuvor aufgezeichnete statische Druck. Daher können diese Messdaten nicht berücksichtigt werden. Das dargestellte Profil in Abbildung 5-31 zeigt den erhaltenen Strömungsverlauf unterhalb des Mahlkammerdeckels. Wie schon in den vorangegangen Kapiteln beschrieben, bildet sich deutlich eine Spiralströmung im Uhrzeigersinn aus, die zum Mittelpunkt der Mahlkammer in Richtung des Tauchrohres gerichtet ist. An der Stirnfläche der Mahlkammer verläuft demnach die untersuchte Strömung analog der Ebene 1 des “Drei-Ebenen-Modells“ [36]. Unabhängig von Radius und der Position des Pitot-Rohres in der Spiralstrahlmühle lassen sich Strömungsgeschwindigkeiten über einen Bereich von 50 bis 140 m/s erfassen, wobei die höheren Strömungsgeschwindigkeiten am äußeren Rand des Tauchrohres (r = 13,0 mm) auftreten.

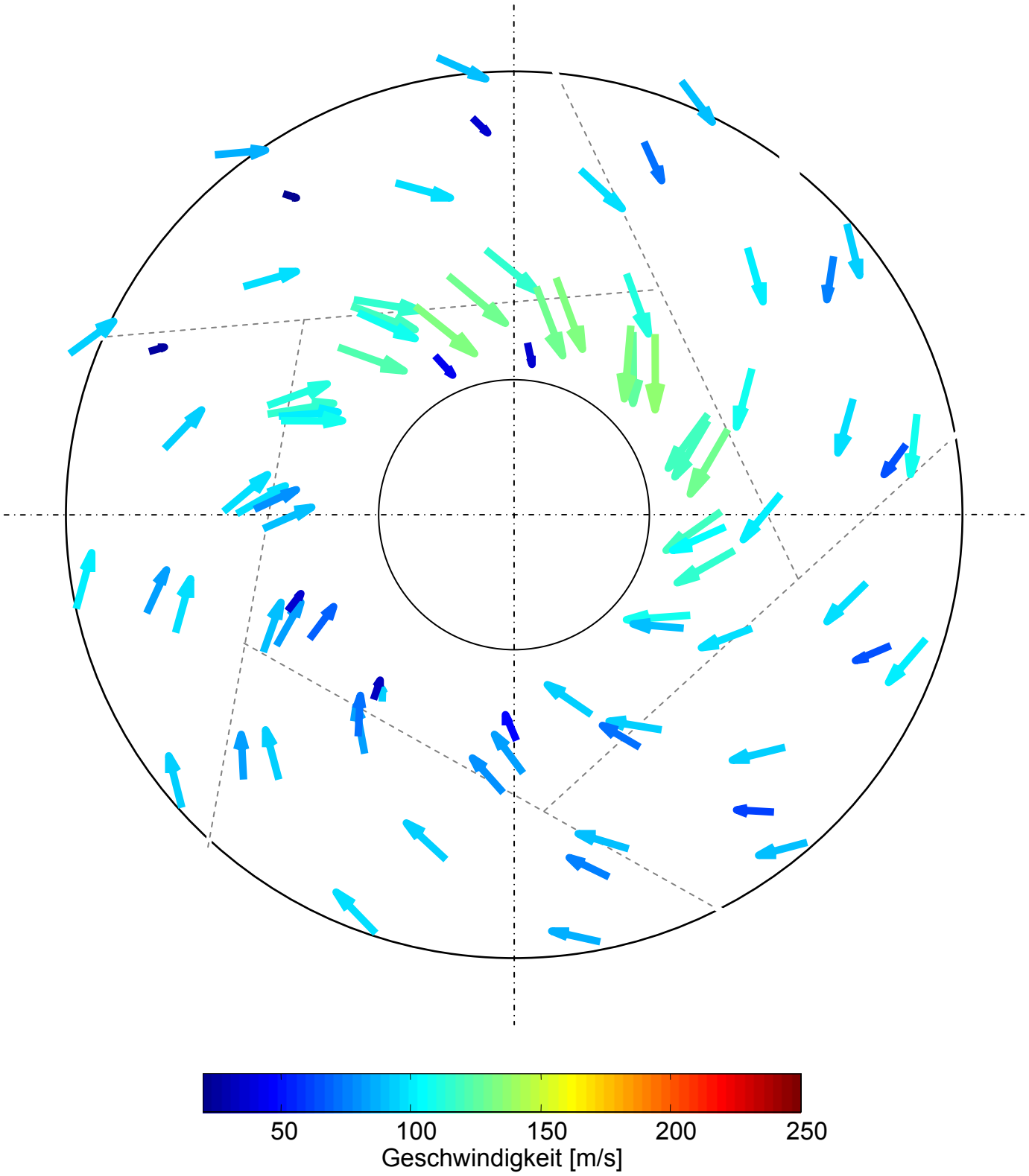


Abbildung 5-31: Strömungsverlauf unterhalb des Mahlkammerdeckels entlang der Wölbung

5.3.5.5 Gesamtdruck und Strömungsgeschwindigkeit auf dem Radius 26,5 mm

Wie bereits in Kapitel 5.3.1 beschrieben, muss zunächst für jede Messposition der Anströmwinkel des Pitot-Rohres in der Strömung ermittelt und der zugehörige Gesamtdruckwert erfasst werden. Sowohl auf dem Radius 35,5 mm als auch auf dem Radius 17,0 mm kann ein merklicher Gesamtdruckanstieg beobachtet werden. Bei der Ausrichtung des Pitot-Rohres in der Strömung auf dem Radius 26,5 mm lässt sich jedoch in Abhängigkeit vom Anströmwinkel der in Abbildung 5-32 wiedergegebene Druckverlauf beobachten:

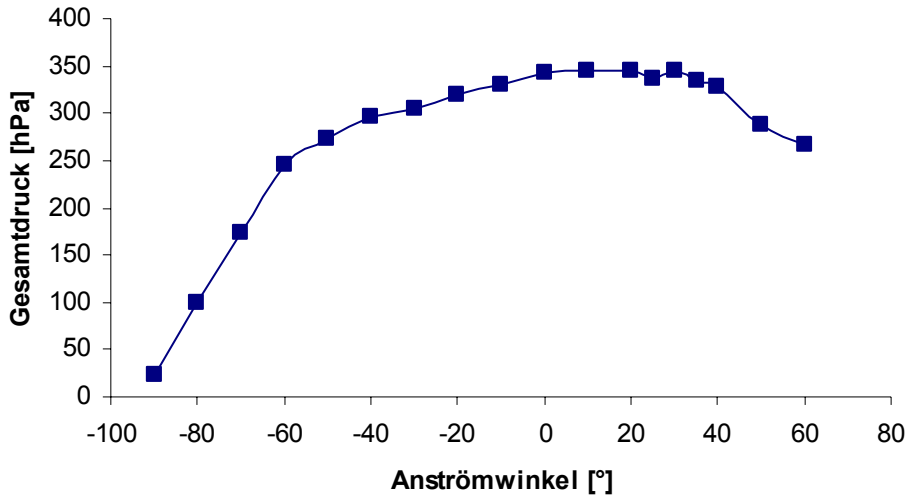


Abbildung 5-32: Einfluss des Anströmwinkels auf den Gesamtdruck, gemessen auf dem Radius 26,5 mm, Position 1, Eintauchtiefe des Pitot-Rohres 6 mm

Im Vergleich zu den Messungen, die auf dem Radius 35,5 mm durchgeführt wurden, vgl. Abbildung 5-11, zeigt sich ein deutlich anderer Verlauf der Gesamtdruckkurve, da ein Peak auf diesem Radius nicht beobachtet werden kann. Die Druckwerte steigen je nach Ausrichtung in der Strömung zwar an, erfahren aber über einen weiten Winkelbereich kein hervorstechendes Maximum.

Abbildung 5-33 stellt die Messbedingungen auf dem Radius 26,5 mm dar:

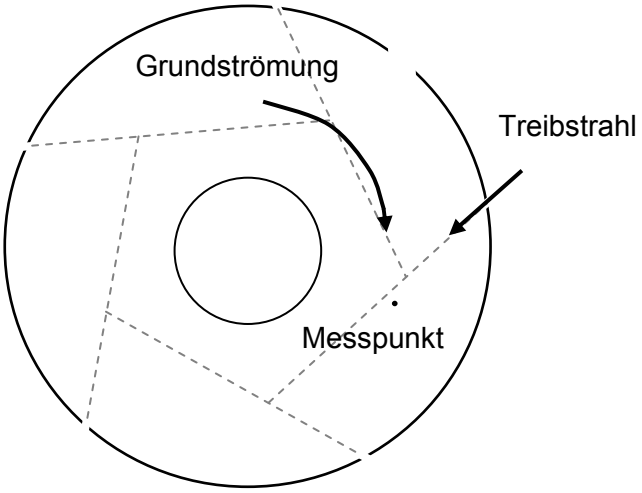


Abbildung 5-33: Skizze zur Erklärung der Messbedingungen auf dem Radius 26,5 mm

Auf diesem Radius wird das Pitot-Rohr bei der Bestimmung des Anströmwinkels genau zwischen der umlaufenden Grundströmung und einem in diese Strömung eintretenden Treibstrahl ausgerichtet. Dies hat zur Folge, dass der Gesamtdruck bei Winkeländerung nicht wie erwartet merklich absinkt, sondern auf gleichem Niveau bleibt. Daher werden jeweils die beiden höchsten, weit auseinander liegenden Gesamtdruckwerte zur Berechnung und der graphischen Darstellung der Strömungsgeschwindigkeiten auf diesem Radius hernagezogen. Es resultieren daraus pro Messposition zwei Geschwindigkeitsvektoren mit unterschiedlicher Richtung. Zur besseren Übersicht werden diese Vektoren eingekreist, wie das nachfolgende Strömungsprofil der Ebene (-1), vgl. auch Abbildung 5-18, zeigt.

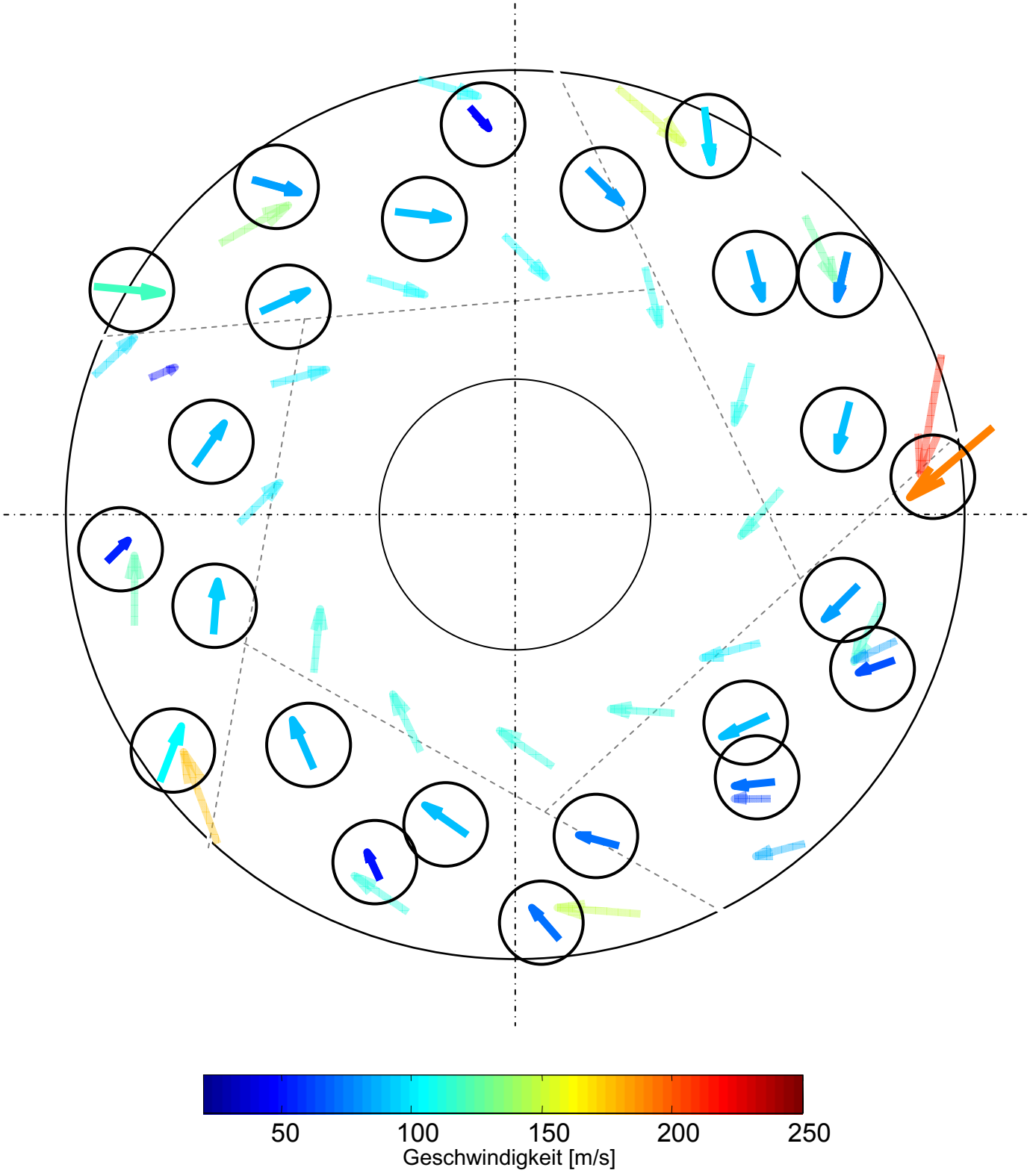


Abbildung 5-34: Strömungsverlauf in Ebene (-1), eingekreist sind die auf dem Radius 26,5 mm ermittelten Werte

5.3.5.6 Beurteilung der Strömungsverläufe in der Spiralstrahlmühle

Die durchgeführten Messungen zeigen, dass das angefertigte Pitot-Rohr geeignet ist, an verschiedenen Radien der Spiralstrahlmühle Gesamtdruckwerte reproduzierbar aufzunehmen. Auf Grund der geometrischen Begrenzung durch den gewählten Mahlspalt von 5 mm lassen sich an einigen Positionen in der Sichtzone sowie innerhalb des Tauchrohres nur begrenzt Messwerte aufzeichnen. Der nach unten gerichtete Strömungssog im Tauchrohr, welcher für die Abscheidungsvorgänge verantwortlich ist, fließt über das Pitot-Rohr hinweg, so dass das Rohr nicht direkt angeströmt wird. Dadurch tritt kein maximaler Gesamtdruckwert auf, der der Berechnung der lokalen Geschwindigkeit zugrunde gelegt werden kann. Innerhalb des Tauchrohres ließen sich demnach geeignete Werte nur mit Hilfe eines an der Spitze stärker gekrümmten Pitot-Rohres aufnehmen. Der Kopf des Pitot-Rohres müsste dabei einen Radius kleiner als den des Tauchrohres von 12,5 mm aufweisen. Diese um ein Vielfaches stärkere Krümmung würde jedoch die Druckwerte verfälschen. Derartige Veränderungen werden daher in dieser Arbeit nicht vorgenommen.

Im Vordergrund der Untersuchungen steht die Ermittlung von Strömungsgeschwindigkeiten und -richtungen, deren zweidimensionale Profildarstellungen anschaulich die Strömungsverläufe in der Spiralstrahlmühle zeigen. Zur vereinfachten Darstellung der komplexen Vorgänge in der Mühle definiert Bauer [4] radial in der Mahlkammer zwei Strömungszonen, die Zerkleinerungs- sowie die Sichtzone, vgl. Kapitel 2.3.1. In Anlehnung an die Arbeiten von Kürten und Rumpf [36] bietet sich für diese Arbeit ebenfalls eine Einteilung des Strömungsfeldes abhängig von der absoluten Mahlkammerhöhe in mehrere Ebenen an. Durch Bezug zu der durch die Mittelpunkte der Mahldüsen aufgespannten Achse soll ein mögliches symmetrisches Strömungsverhalten in der Mahlkammer übersichtlich dargestellt werden. Bereiche oberhalb der Treibstrahlen sind mit Ebenen, die sich unterhalb der Treibstrahlen in gleichem Abstand befinden, zu vergleichen.

So zeigen alle vorangegangenen Ebenenbilder einen qualitativ gleichartigen Strömungsverlauf, den einer typischen Spiralströmung. Unterschiede in Geschwindigkeit und Richtung der einzelnen Strömungsvektoren lassen sich abhängig von den untersuchten Parametern Messposition, Eintauchtiefe sowie radiale Positionierung des Pitot-Rohres in der Mahlkammer bestimmen.

Von herausragender Bedeutung für das Strömungsverhalten in der Mühle sind die Ebenen der Treibstrahlen (+1) und (-1). Auf dem peripheren Radius von 35,5 mm wird

die Strömungsgeschwindigkeit maßgeblich durch die Treibstrahlen beeinflusst, so dass je nach Messposition Werte von 90 bis über 200 m/s auftreten. In unmittelbarer Nähe zu einer Düse kann eine merkliche Steigerung der Geschwindigkeit beobachtet werden, vgl. Kapitel 5.3.3. Die Strömung folgt auf diesem Radius dem Umfang der Mahlkammer mit kleiner radialer Komponente. Betrachtet man nun die Strömungsgeschwindigkeiten, aufgenommen auf dem Radius 26,5 mm, so wird deutlich, dass diese durchschnittlich 50 bis 90 m/s erreichen. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass die durchgeführten Messungen inmitten der zirkulierenden Grundströmung erfolgen. Weiter zur Sichtzone hin nimmt die Geschwindigkeit zunächst ab, was auf den Energieverlust bei der Beschleunigung der Grundströmung zurückzuführen ist. Der Anströmwinkel des Pitot-Rohres von -345° deutet darauf hin, dass an diesem Radius die radiale Komponente der Strömung bereits stark zugenommen hat und in Richtung des Tauchrohres zeigt.

Es fällt weiterhin auf, dass der Einfluss der Treibstrahlen nur auf eine kleine radiale Zone begrenzt ist. Daraus ist abzuleiten, dass der Strahl beim Eintreten in die Mahlkammer weit aufplatzt und seine ursprüngliche Geschwindigkeit verliert. Aus diesem Grund kann auf dem Radius r = 26,5 mm nur noch die Geschwindigkeit der zirkulierenden Grundströmung gemessen werden. Dies ist in guter Übereinstimmung mit dem Verlauf des Treibstrahls nach Abramowitsch [1] anzusehen, siehe auch Kapitel 2.3.1.

Auf Grund ihrer gleichartigen Strömungseigenschaften ist es sinnvoll, die weiteren Ebenen ober- bzw. unterhalb der Treibstrahlebenen zusammenzufassen und vergleichend zu betrachten. In der Mahlkammerperipherie der Ebenen (+2) bis (+4) oberhalb der Symmetrieachse als auch in den Ebenen (-2) bis (-4) unterhalb dieser können Geschwindigkeitswerte von 90 bis 100 m/s berechnet werden, was auf ein weites Aufplatzen des eintretenden Strahls über mehrere Ebenen hindeutet. Die Geschwindigkeit der zirkulierenden Strömung beträgt, wie in den Ebenen (+1) und (-1), ungefähr 70 bis 90 m/s.

Die weitere Betrachtung des Strömungsverlaufs über der Mahlkammerhöhe zeigt, dass die Anordnung des Tauchrohres in der Mahlkammer ein weiteres symmetrisches Verhalten nicht erlaubt. In den Ebenen (+2) bis (+4) oberhalb der Treibstrahlebenen zeigen die Vektoren auf dem äußeren Rand des Tauchrohres (r = 13,0 mm) erhöhte Werte von bis zu 120 m/s an, was den notwendigen Abscheidungssog andeutet. Dieser Effekt kann in den Ebenen (-2) bis (-4) jedoch nicht beobachtet werden. Die Geschwindigkeiten in der Sichtzone nehmen hier auf ungefähr 90 m/s ab.

Für die nach oben und unten folgenden Ebenen resultiert ebenfalls ein anderer Verlauf mit veränderten Geschwindigkeitsverhältnissen. In den oberen Ebenen der Mahlkammer (+5) und (+6) lassen sich auf Grund der Messanordnung nur Geschwindigkeiten innerhalb der Sichtzone mit deutlich erhöhten Werten von ca. 140 m/s aufnehmen.
Die Bereiche an der Bodenfläche der Mahlkammer dagegen, Ebene (-5) bis (-8), liefern nur noch vereinzelt Messwerte von ca. 75 m/s. Deckel- und Bodenfläche der Mahlkammer verhalten sich demnach nicht spiegelbildlich zueinander, wie es durch den asymmetrischen Aufbau der Strahlmühle zu erwarten ist.
Die Erfassung der Strömung entlang der Stirnfläche der Mahlkammer dient zum direkten Vergleich des von Kürten und Rumpf im “Drei-Ebenen-Modell“ [36] dargestellten Verhaltens. Der aufgezeichnete Strömungsverlauf steht jedoch nur in guter Übereinstimmung mit der in diesem Modell vorgestellten Ebene 1. Nach Kürten und Rumpf verläuft die Strömung an Deckel und Boden der Mahlkammer spiralförmig zum Tauchrohr. Dieser gleichartige, spiralige Verlauf ist jedoch in jeder Ebene der eingesetzten Mühle zu beobachten. Es lässt sich daher der Schluss ziehen, dass die hier untersuchte Strömung nicht dem postulierten Verlauf des “Drei-Ebenen-Modells“, vgl. Kapitel 2.3.3, entspricht. Die Strömungsverläufe in den Abbildungen 5-17 bis 5-31 zeigen deutlich, dass die Ebenen der Treibstrahlen eindeutig von anderen Bereichen abzugrenzen sind. Wie die Autoren [36] beschreiben, soll zur Kompensation der auftretenden Druckverhältnisse in Bereichen oberhalb und unterhalb der Treibstrahlen Fluid zum Mahlkammerrand zurückströmen. Derartige Rückströmungen oder sogar Turbulenzen lassen sich jedoch mit Hilfe der durchgeführten Druckmessungen in diesen Bereichen nicht beobachten, da die Strömung immer spiralig zum Mahlkammermittelpunkt gerichtet ist. Aus diesem Grund kann das “Drei-Ebenen-Modell“ nicht bestätigt werden.
Da in der Literatur nur wenig Datenmaterial über Messungen im Leerbetrieb der Spiralstrahlmühle vorliegt, sollen Messergebnisse von Muschelknautz [52] zu Vergleichszwecken der Strömungsgeschwindigkeit herangezogen werden. Neben der Aufnahme statischer Druckkennlinien bestimmte er mit Hilfe von Flügelrädchen die lokalen Umfangsgeschwindigkeiten in Abhängigkeit vom Radius der Mahlkammer. Genaue Angaben zur Versuchsdurchführung bezüglich Messposition und Eintauchtiefe zum direkten Vergleich mit den Messergebnissen der vorliegenden Arbeit sind jedoch seinen Untersuchungen nicht zu entnehmen. Die Messungen von Muschelknautz, vgl. Abbildung 2-13, liefern in der Mahlkammerperipherie hohe Umfangsgeschwindigkeiten,

die mit abnehmendem Radius ansteigen. Auf dem Tauchrohrradius kann eine maximale Umfangsgeschwindigkeit bestimmt werden. Innerhalb des Abscheiderohres fällt die Geschwindigkeit langsam wieder ab.

Die in der vorliegenden Arbeit beschriebenen Messungen der lokalen Geschwindigkeit zeigen einen analogen Verlauf zu der schon bei Muschelknautz beobachteten Strömung. Besonders an der Stirnfläche der Mahlkammer sowie im Bereich oberhalb der Treibstrahlen steigt die Strömungsgeschwindigkeit mit abnehmendem Radius an. Zudem treten höhere Geschwindigkeitswerte im Bereich der Sichtzone, besonders auf dem äußeren Rand des Tauchrohres auf. In Bereichen unterhalb der Treibstrahlen bzw. am Boden der Mahlkammer kann die nach oben gerichtete Strömung mittels eingebrachtem Pitot-Rohr nicht erfasst werden, da dieses nur in horizontaler Ausrichtung in der Grundströmung positioniert ist.

5.3.5.7 Bestimmung der Treibstrahllänge

Um weitere Erkenntnisse über die Treibstrahlebenen zu gewinnen, soll die maximale Länge eines Treibstrahls bzw. seine Eindringweite in die Mahlkammer näher untersucht werden. Nach der Rumpf´schen Theorie der Strahlmahlung [70, 72] wird die Geschwindigkeit des Treibstrahls nach einer Länge von ca. 10- bis 20 fachem Düsendurchmesser auf die Geschwindigkeit der Grundströmung gemindert. Bei den hier genutzten Düsen mit einem Durchmesser von 0,7 mm beträgt demnach die maximale Länge eines Treibstrahls 7 bis 14 mm. Von weiterem Interesse ist daher eine genauere Eingrenzung dieses Wertes. Wie aus den vorangegangenen Strömungsprofilen der Ebenen (+1) und (-1) hervorgeht, ist der Einfluss der Treibstrahlen in den Düsenebenen nur im Bereich der Mahlkammerperipherie (Radius 35,5 mm) klar erkennbar. Auf dem weiter innen liegenden Radius von 26,5 mm sind derartig hohe Geschwindigkeiten nicht mehr messbar. Diese Erkenntnis wird zur Ermittlung der Reichweite eines Treibstrahls herangezogen. Zu diesem Zweck wird ein Strömungsvektor ausgewählt, dessen Spitze dem Verlauf des Treibstrahls folgt, aber keine erhöhte Geschwindigkeit gegenüber einem anderen Vektor auf dem gleichen Radius aufweist. Dazu bietet sich ein Vektor der Ebene (-1) auf dem Radius 26,5 mm an. Die folgende Abbildung 5-35 stellt den Ausschnitt eines Strömungsprofils dieser Ebene dar und gibt die zur Bestimmung der Treibstrahllänge erforderlichen Seitenlängen und Winkelangaben an:

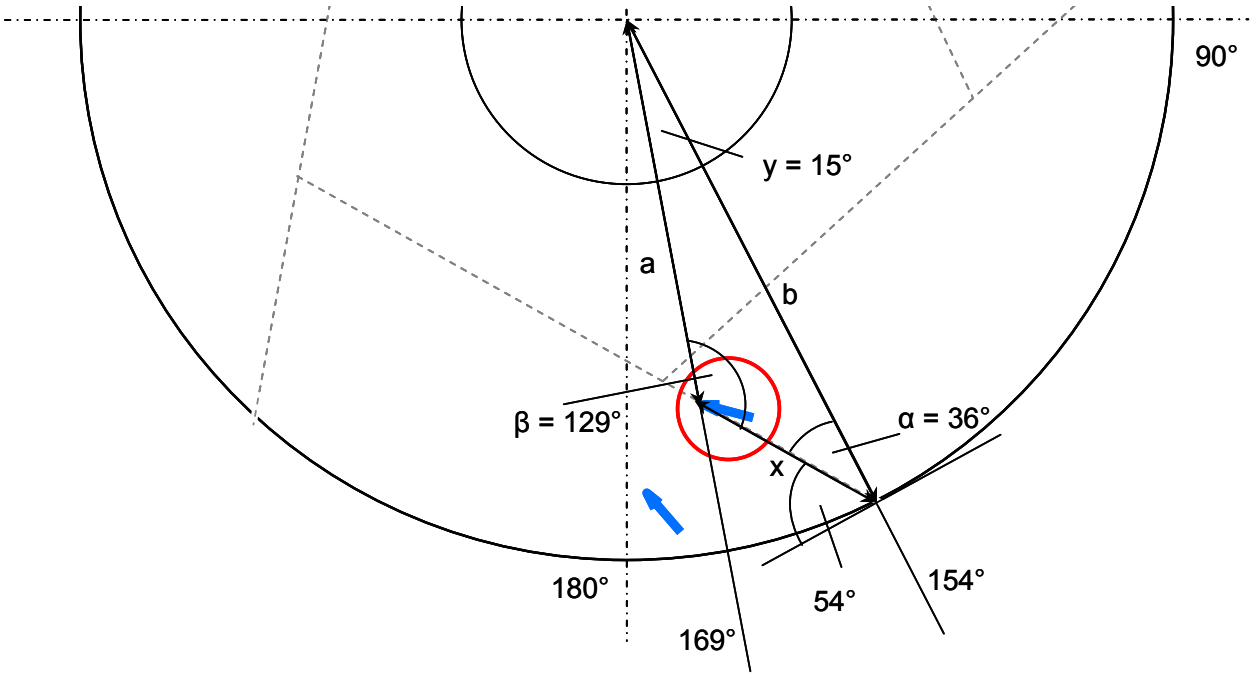


Abbildung 5-35: Skizze zur Erklärung der Bestimmung der Treibstrahllänge, beispielhaft dargestellt an einem Strömungsvektor der Ebene (-1). Die Geschwindigkeit beider Vektoren auf dem Radius 26,5 mm beträgt 75 m/s.

Die Seitenlänge b bezeichnet den Radius der Mahlkammer von 40 mm und die Länge a den tatsächlichen Radius, an dem das Pitot-Rohr optimal angeströmt wird. Durch den Düsenanstellwinkel von 54° zur Tangente beträgt der benachbarte Winkel α 36°. Die absolute Lage der betrachteten Treibstrahldüse in der Strahlmühle beträgt 154°, die Lage der Spitze des Pitot-Rohres an dieser Messposition 169°, so dass sich durch Differenzbildung ein Winkel von 15° ergibt. Für den der Seite b gegenüberliegenden Winkel β ermittelt man demnach 129°. Die Seite x stellt die gesuchte Länge des Treibstrahls dar.

In einem beliebigen Dreieck gilt nach dem Sinussatz folgende Beziehung zwischen Winkeln und Seitenlängen:

$$\frac{a}{\sin \alpha} = \frac{b}{\sin \beta} = \frac{x}{\sin y} \qquad (5.3)$$

a, b	Seitenlängen [m]
x	gesuchte Seitenlänge [m]
α, β	Winkel [°], gegenüberliegend zu a bzw. b
y	Winkel [°], gegenüberliegend zu x

Mit β = 129° und y = 15° kann für die Seitenlänge x ein Wert von 13,3 mm berechnet werden. Daraus folgt, dass der Treibstrahl nach einer maximalen Einströmweite von 13 mm die Geschwindigkeit der umlaufenden Grundströmung von 75 m/s erreicht hat.

Mit der genutzten Messvorrichtung lässt sich jedoch nicht erfassen, ob der Treibstrahl eine kürzere Reichweite in die Mahlkammer hinein besitzt. Dennoch steht dieses ausgewählte Beispiel im Einklang mit den von Rumpf postulierten Längenangaben für den eintretenden Treibstrahl.

5.3.6 Gesamtdruck und Strömungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Mahldruck

In dieser Versuchsreihe soll der Einfluss von erhöhten Mahl- und Injektordrücken auf den Gesamtdruck sowie die Geschwindigkeit in der Spiralstrahlmühle untersucht werden. Dazu wird der Mahldruck ausgehend von $4{,}0 \cdot 10^5$ Pa schrittweise um $0{,}5 \cdot 10^5$ Pa erhöht. Eine weitere Druckerhöhung über $6{,}0 \cdot 10^5$ Pa hinaus ist nicht sinnvoll, um eine Überlastung des Pitot-Rohres zu vermeiden. Der Injektordruck wird jeweils $0{,}5 \cdot 10^5$ Pa über dem Mahldruck eingestellt. Das Pitot-Rohr wird auf dem Radius 35,5 mm mit einer Eintauchtiefe von 6 bzw. 7 mm in der Treibstrahlebenen (+1) und (-1) platziert, um bei jeweils optimaler Anströmung Gesamtdruckwerte an zwölf Positionen aufzunehmen, wie Tabelle 5-16 zeigt. Die zugehörigen lokalen Geschwindigkeiten werden mit Hilfe der Funktionsgleichungen für den statischen Druck, siehe Tabelle 5-4, berechnet und in der folgenden Tabelle 5-17 dargestellt:

	Position											
Mahldruck [10^5 Pa]	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**
4,0	452	528	458	898	430	416	460	433	532	448	437	476
4,5	503	598	522	975	485	461	536	487	615	497	480	529
5,0	566	664	587	1070	546	524	616	552	700	562	547	594
5,5	619	724	643	1140	589	577	685	608	754	615	601	648
6,0	674	787	700	1200	652	627	748	663	835	672	654	703

Tabelle 5-16: Mittelwerte des Gesamtdrucks in hPa in Abhängigkeit vom Mahldruck, Ebene (+1), gemessen auf dem Radius 35,5 mm, Position 4, Eintauchtiefe des Pitot-Rohres 6 mm (n = 5)

	Position											
Mahldruck [10^5 Pa]	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**
4,0	113	148	123	248	114	91	124	110	149	104	97	125
4,5	125	163	140	257	128	103	146	124	169	116	108	136
5,0	129	166	144	261	132	109	155	129	177	122	115	140
5,5	134	171	150	264	133	115	164	136	180	127	121	145
6,0	134	172	151	262	138	114	167	137	186	128	120	145

Tabelle 5-17: Strömungsgeschwindigkeiten in m/s in Abhängigkeit vom Mahldruck, Ebene (+1), gemessen auf dem Radius 35,5 mm, Position 4, Eintauchtiefe des Pitot-Rohres 6 mm

Die gemessenen Daten für den Gesamtdruck und die daraus berechneten Geschwindigkeiten zeigen einen deutlichen Anstieg der Werte bei zunehmendem Mahldruck. Ein linearer Zusammenhang besteht jedoch nicht. Wie die graphische Darstellung der Geschwindigkeitswerte in Abbildung 5-36 zeigt, nimmt die Geschwindigkeit an allen Positionen bei Einstellung des Mahldrucks von 4,0 bis $5{,}5 \cdot 10^5$ Pa stetig zu. Bei der weiteren Erhöhung auf $6{,}0 \cdot 10^5$ Pa stagniert jedoch der Kurvenverlauf bei fast allen Positionen. Das Auftreten von hohen Geschwindigkeiten an Position 4 ist auf die unmittelbare Nähe zu einer Treibstrahldüse zurückzuführen. Wie schon die Untersuchungen bei veränderter Position des Pitot-Rohres gezeigt haben, vgl. Kapitel 5.3.3, sinkt die Geschwindigkeit der Strömung mit zunehmender Entfernung des Rohres von der Düse.

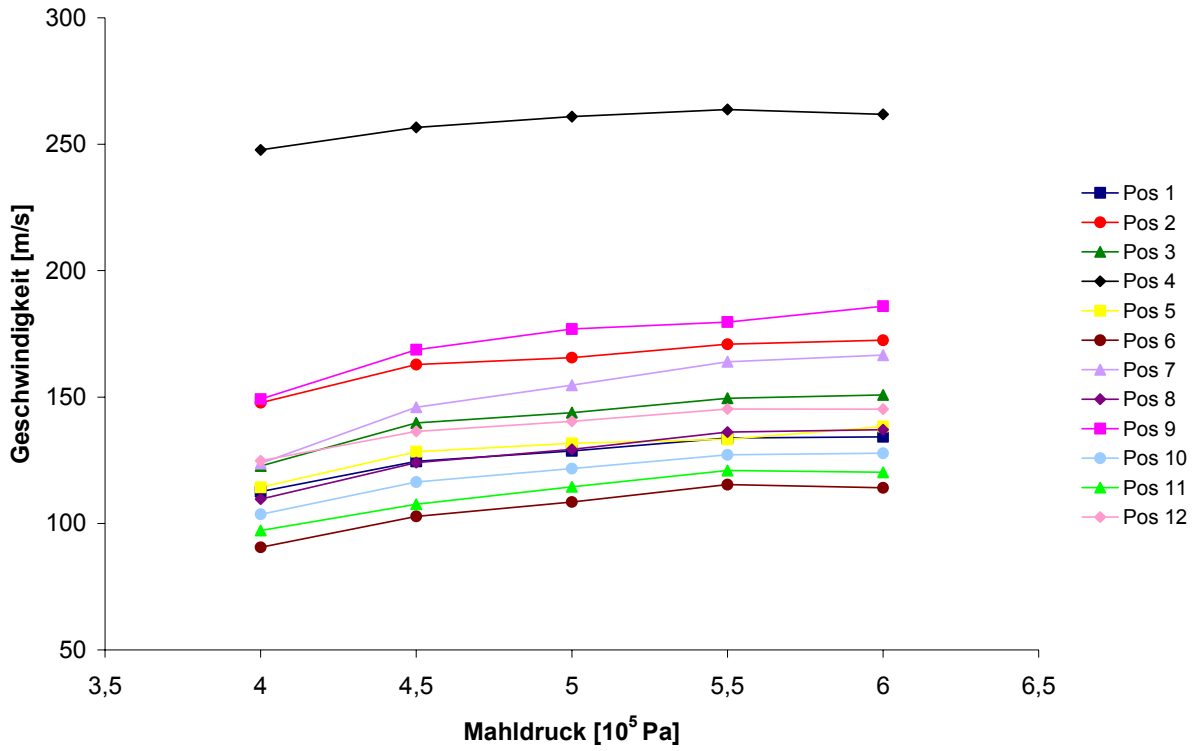


Abbildung 5-36: Strömungsgeschwindigkeiten in Abhängigkeit von Mahldruck und Position, Ebene (+1), gemessen auf dem Radius 35,5 mm, Position 4, Eintauchtiefe des Pitot-Rohres 6 mm

Da der Treibstrahl beim Eintritt in die Mahlkammer aufplatzt und sich daher über zwei Ebenen erstreckt, muss auch in der nachfolgenden Ebene (-1) gemessen werden. Tabelle 5-18 gibt die dort aufgezeichneten Gesamtdruckwerte in hPa an:

	Position											
Mahldruck [10^5 Pa]	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**
4,0	450	541	468	750	428	417	516	442	610	461	437	491
4,5	493	586	514	914	472	460	577	493	679	509	477	540
5,0	555	651	574	1060	533	519	646	554	760	573	540	602
5,5	609	707	629	1200	586	572	714	608	831	629	593	659
6,0	664	767	687	1315	637	623	776	664	900	686	647	714

Tabelle 5-18: Mittelwerte des Gesamtdrucks in hPa in Abhängigkeit vom Mahldruck, Ebene (-1), gemessen auf dem Radius 35,5 mm, Position 4, Eintauchtiefe des Pitot-Rohres 7 mm (n = 5)

Der Gesamtdruck nimmt mit steigendem Mahldruck proportional zu, wie auch schon die Messergebnisse in Ebene (+1) zeigten.

Betrachtet man nun die in der nachfolgenden Tabelle 5-19 dargestellten Strömungsgeschwindigkeiten und deren graphische Darstellung, siehe Abbildung 5-37, dann nimmt die Strömungsgeschwindigkeit an allen Positionen bei Einstellung des Mahldrucks von 4,0 bis $5{,}5 \cdot 10^5$ Pa wiederum zu.

	Position											
Mahldruck [10^5 Pa]	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**
4,0	105	152	128	215	119	84	149	115	176	128	98	141
4,5	115	159	136	245	127	96	161	127	188	134	106	147
5,0	118	161	139	259	131	100	165	130	194	138	111	150
5,5	125	166	144	274	137	107	173	136	200	144	117	155
6,0	125	166	146	280	138	105	175	138	202	146	117	156

Tabelle 5-19: Strömungsgeschwindigkeiten in m/s in Abhängigkeit vom Mahldruck, Ebene (-1), gemessen auf dem Radius 35,5 mm, Position 4, Eintauchtiefe des Pitot-Rohres 7 mm

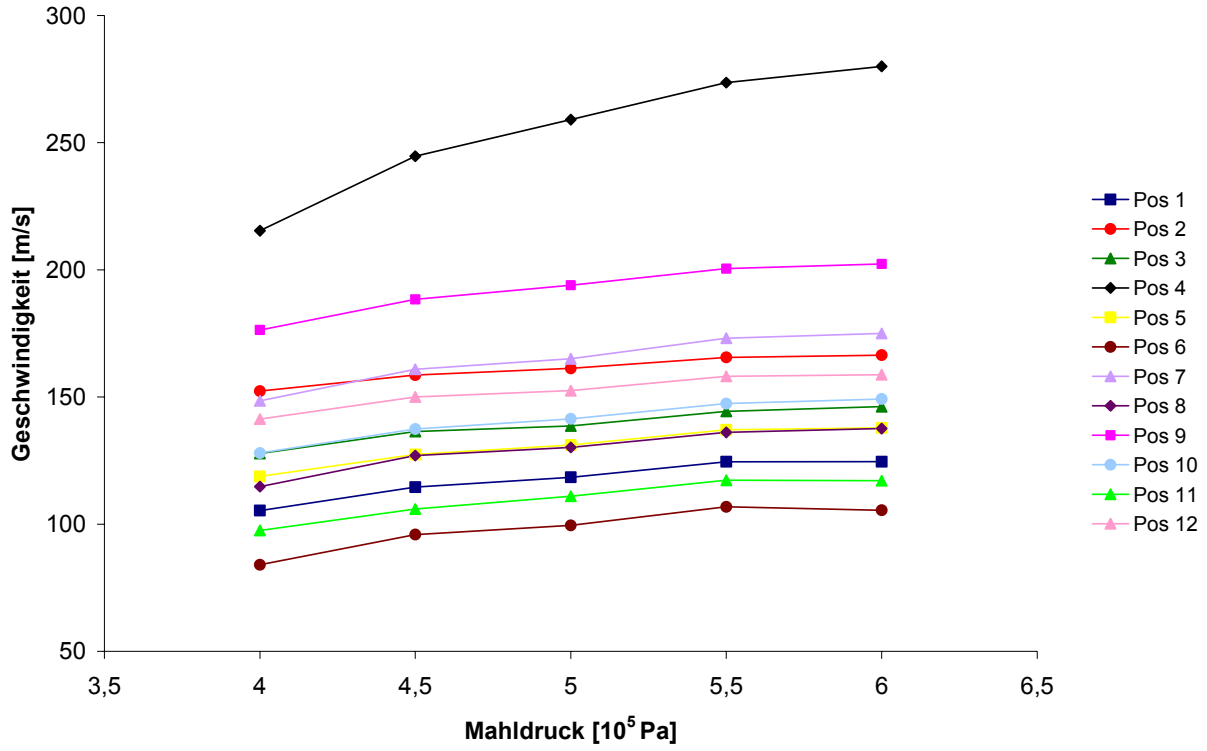


Abbildung 5-37: Strömungsgeschwindigkeiten in Abhängigkeit vom Mahldruck, Ebene (-1), gemessen auf dem Radius 35,5 mm, Position 4, Eintauchtiefe des Pitot-Rohres 7 mm

Eine weitere Erhöhung des Mahldrucks auf $6{,}0 \cdot 10^5$ Pa führt zu keiner weiteren Steigerung der Strömungsgeschwindigkeiten. Es werden jedoch höhere Endgeschwindigkeiten als in der höher gelegenen Ebene (+1) erreicht. Dies lässt den Schluss zu, dass das Pitot-Rohr hier maximal belastet wird. Während der Messungen fällt zudem auf, dass das Rohr bei steigendem Druck nicht mehr stabil fixiert ist und leichte Vibrationen auftreten.

Es zeigt sich also in den Treibstrahlbereichen der Ebenen (+1) und (-1) auf dem Radius 35,5 mm ein analoges Verhalten der gemessenen Geschwindigkeiten. Bestätigt wird noch einmal, dass die Entfernung des Pitot-Rohres von einer Treibstrahldüse einen wesentlichen Einfluss auf die Gesamtdruckwerte nimmt, wie bereits in Kapitel 5.3.3 beschrieben.

5.3.7 Fehlerbetrachtung

Zur Berechnung der Strömungsgeschwindigkeit nach der “kompressiblen Bernoulli-Gleichung“ müssen Gesamtdruck, statischer Druck sowie Temperatur empirisch ermittelt werden. Jeder dieser Messwerte ist dabei mit Fehlern behaftet, die sich auf den Geschwindigkeitswert auswirken. Daher soll beispielhaft der Maximalfehler für die höchste auftretende Geschwindigkeit berechnet werden, die bei Einstellung des Mahldrucks von $4{,}0 \cdot 10^5$ Pa ermittelt wird.

Nach Papula [60] lässt sich der maximale Fehler einer Funktion z = f (a, b, c…) allgemein durch das totale Differential angeben:

$$dz = \left|\frac{\partial z}{\partial a}da\right| + \left|\frac{\partial z}{\partial b}db\right| + \left|\frac{\partial z}{\partial c}dc\right| + ... \qquad (5.4)$$

dz	Maximalfehler
$\frac{\partial z}{\partial a}, \frac{\partial z}{\partial b}, \frac{\partial z}{\partial c}...$	partielle Ableitung von z nach den Messgrößen a, b, c…
da, db, dc…	Einzelfehler der Messgrößen a, b, c…

Außerdem müssen die Messungenauigkeiten der verwendeten Geräte entsprechend den Herstellerangaben [16, 19] berücksichtigt werden:

Messgröße	Messgerät	Messbereich	Messungenauigkeit
Temperatur	D 10, Firma WIKA	- 20….+ 80°C	± 0,5 °C
Gesamtdruck	D 10, Firma WIKA	0 … $6 \cdot 10^5$ Pa	± 6 hPa
Statischer Druck	XT 190 M, Firma Kulite	0 … $6 \cdot 10^5$ Pa	± 25 hPa

Tabelle 5-20: Übersicht über die verwendeten Messgeräte mit den zu berücksichtigenden Messungenauigkeiten

Die für die Berechnung der Strömungsgeschwindigkeit notwendigen Formeln, vgl. Gleichungen 2.9 und 2.18, werden entsprechend vereint:

$$v = \sqrt{\frac{2}{\kappa - 1}\left[\left(\frac{p_{ges}}{p_{stat}}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1\right]} \cdot \sqrt{\kappa R_L T} \tag{5.5}$$

v	Geschwindigkeit [m/s]
κ	Isentropenkoeffizient [-]
p_{ges}	Gesamtdruck [Pa]
p_{stat}	statischer Druck [Pa]
R_L	spezifische Gaskonstante Luft [287,22 J/(kg K)]
T	Temperatur [K]

In diesem Fall gilt für das totale Differential nach Gleichung 5.4:

$$\frac{\Delta v_{max}}{\overline{v}_{max}} = \left|\frac{\partial v}{\partial T}\Delta T\right| + \left|\frac{\partial v}{\partial p_{stat}}\Delta p_{stat}\right| + \left|\frac{\partial v}{\partial p_{ges}}\Delta p_{ges}\right| \tag{5.6}$$

Δv_{max}	maximaler Fehler der Geschwindigkeit [m/s]
$\overline{v}_{max}$	Mittelwert der maximalen Geschwindigkeit [m/s]
$\frac{\partial v}{\partial T}$	partielles Differential der Geschwindigkeit nach der Temperatur [m/(s K)]
ΔT	Messungenauigkeit des Temperaturaufnehmers [K]
$\frac{\partial v}{\partial p_{stat}}$	partielles Differential der Geschwindigkeit nach dem statischen Druck [m/(s Pa)]
Δp_{stat}	Messungenauigkeit des Druckaufnehmers für den statischen Druck [Pa]
$\frac{\partial v}{\partial p_{ges}}$	partielles Differential der Geschwindigkeit nach dem Gesamtdruck [m/(s Pa)]
Δp_{ges}	Messungenauigkeit des Druckaufnehmers für den Gesamtdruck [Pa]

Die partiellen Differentiale lassen sich wie folgt formulieren:

$$\frac{\partial v}{\partial T} = \sqrt{\frac{2}{\kappa - 1}\left[\left(\frac{p_{ges}}{p_{stat}}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1\right]} \cdot \frac{\sqrt{\kappa R_L}}{2\sqrt{T}} \tag{5.7}$$

$$\frac{\partial v}{\partial p_{stat}} = -\sqrt{\frac{2}{\kappa - 1}} \cdot \sqrt{\kappa R_L T} \cdot \frac{\left(\frac{p_{ges}}{p_{stat}}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}}{2\kappa p_{stat}\sqrt{\left[\left(\frac{p_{ges}}{p_{stat}}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1\right]}} \tag{5.8}$$

$$\frac{\partial v}{\partial p_{ges}} = \sqrt{\frac{2}{\kappa - 1}} \cdot \sqrt{\kappa R_L T} \cdot \frac{\left(\frac{p_{ges}}{p_{stat}}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}}{2 \kappa p_{ges} \sqrt{\left[\left(\frac{p_{ges}}{p_{stat}}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1\right]}} \tag{5.9}$$

Die maximale Geschwindigkeit von 248 m/s wird über den Gesamtdruck von 898,2 hPa (plus 1013 hPa Atmosphärendruck) bei einer Temperatur von 26 °C (299,15 K) unter Zuhilfenahme des statischen Drucks von 327,9 hPa (plus 1013 hPa Atmosphärendruck) ermittelt. Wird ein Isentropenkoeffizient von 1,405 und die spezifische Gaskonstante der Luft von 287,22 J/(kg K) in Gleichung 5.5 eingesetzt, gilt für das jeweilige partielle Differential:

$$\frac{\partial v}{\partial T} = \sqrt{\frac{2}{1{,}405 - 1}\left[\left(\frac{191120}{134090}\right)^{\frac{1{,}405-1}{1{,}405}} - 1\right]} \cdot \frac{\sqrt{1{,}405 \cdot 287{,}22}}{2\sqrt{299{,}15}} \left[\frac{m}{s\,K}\right] \tag{5.10}$$

$$\frac{\partial v}{\partial p_{stat}} = -\sqrt{\frac{2}{1{,}405 - 1}} \cdot \sqrt{1{,}405 \cdot 287{,}22 \cdot 299{,}15} \cdot \frac{\left(\frac{191120}{134090}\right)^{\frac{1{,}405-1}{1{,}405}} \cdot \frac{191120}{(134090)^2}}{2 \cdot 1{,}405 \cdot 134090 \sqrt{\left[\left(\frac{191120}{134090}\right)^{\frac{1{,}405-1}{1{,}405}} - 1\right]}}$$

$$\left[\frac{m}{s\,Pa}\right] \tag{5.11}$$

$$\frac{\partial v}{\partial p_{ges}} = \sqrt{\frac{2}{1{,}405 - 1}} \cdot \sqrt{1{,}405 \cdot 287{,}22 \cdot 299{,}15} \cdot \frac{\left(\frac{191120}{134090}\right)^{\frac{1{,}405-1}{1{,}405}}}{2 \cdot 1{,}405 \cdot 191120 \sqrt{\left[\left(\frac{191120}{134090}\right)^{\frac{1{,}405-1}{1{,}405}} - 1\right]}} \left[\frac{m}{s\,Pa}\right] \tag{5.12}$$

Vereinfachend lässt sich dann formulieren:

$$\Delta v_{max} = |1{,}2277 \cdot 0{,}5| + |-0{,}0028 \cdot 2500| + |0{,}0020 \cdot 600| = 8{,}8005 \text{ m/s} \quad (5.13)$$

Der absolute maximale Fehler beträgt bei 248 m/s demnach ± 8,8 m/s.

$$\frac{\Delta v_{max}}{\overline{v}_{max}} = \frac{8{,}8005}{248} = 0{,}0355 \mathrel{\hat{=}} 3{,}55\% \quad (5.14)$$

Der relative maximale Fehler kann mit Hilfe von Gleichung 5.6 berechnet werden und beträgt 3,55%.

5.3.8 Gesamtdruck in Abhängigkeit von der Feststoffbeladung

Die Messungen des Gesamtdrucks mit Feststoffbeladung der Strahlmühle erfolgen auf dem Radius 35,5 mm bei einer Eintauchtiefe des Pitot-Rohres von 6 mm in Ebene (+1). Im Leerbetrieb der Mühle können an dieser Position die höchsten Druckwerte aufgenommen werden. Eine Förderrate der Mahlsubstanz von 3,49 g/min hat sich in den Messungen des statischen Drucks, vgl. Kapitel 5.1.5, als geeignet erwiesen, um bei vorgegebener Einstellung der operativen Parameter stabile Druckzustände in der Mühle zu erzielen. Es ist zu erwarten, dass die aufgezeichnete Gesamtdruckkurve analog zu den statischen Druckkurven verläuft: Durch die nach 30 Sekunden einsetzende Feststoffzufuhr sinkt der Druck bis auf einen konstanten Wert ab.

Um ein Verstopfen des Pitot-Rohres zu verhindern, wird zwischen Druckaufnehmer D 10 und Messrohr eine Freiblasvorrichtung, siehe Abbildung 4-6, eingebaut. Durch einen Luftstoß von $1{,}75 \cdot 10^5$ Pa (Intervall 20 s) soll das Rohr von feinen Partikeln freigehalten werden.

Abbildung 5-38 gibt den Verlauf einer beispielhaft ausgewählten Gesamtdruckkurve wieder, die über eine Messdauer von 15 Minuten aufgenommen wird:

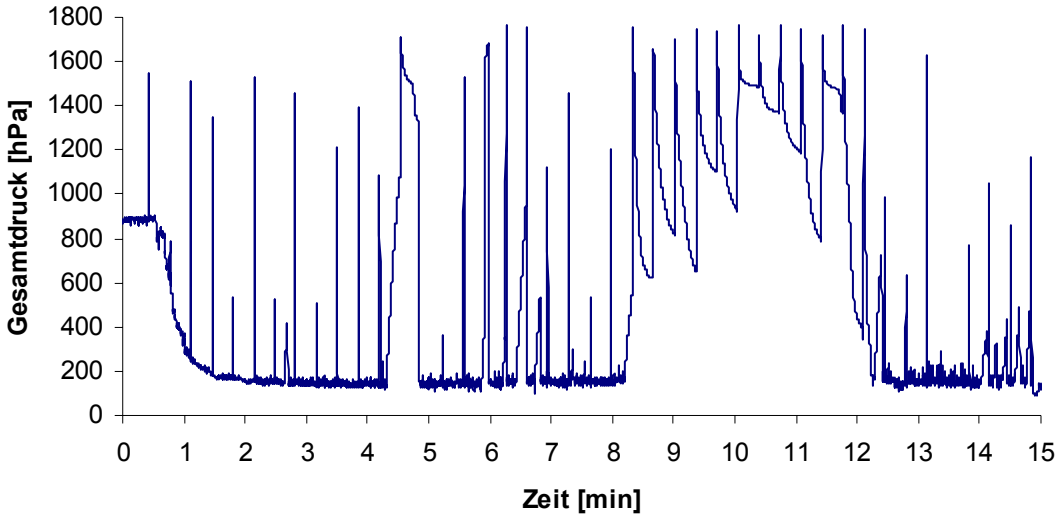


Abbildung 5-38: zeitlicher Verlauf des Gesamtdrucks bei einer Förderrate von 3,49 g/min der Modellsubstanz Criscarb®, Mahldruck $4{,}0 \cdot 10^5$ Pa, Injektordruck $4{,}5 \cdot 10^5$ Pa, Mahlspalt 5 mm, Radius 35,5 mm, Position 4, Eintauchtiefe des Pitot-Rohres 6 mm, Anströmwinkel -5°, Ebene (+1), Spülgasdruck $1{,}75 \cdot 10^5$ Pa, 15 min

Durch die Mahlgutzufuhr wird die Geschwindigkeit der Strömung vermindert mit der Folge, dass der gemessene Gesamtdruck von ungefähr 900 hPa auf ca. 150 hPa absinkt. Besonders auffällig sind jedoch die auftretenden Strömungsinstabilitäten. Immer wieder verstopft das Pitot-Rohr, so dass keine gleichmäßige Messwertaufnahme gegeben ist. Im weiteren Verlauf setzt sich die Spitze des Messrohres sogar vollständig zu, dass diese auch mit Hilfe des Spülgasstroms über mehrere Minuten nicht von Partikeln befreit werden kann. Nur durch Anwendung eines Minibohrers gelingt es, das stark verdichtete Pulverbett aus der Rohrspitze zu entfernen. Die zahlreichen Druckanstiege bis auf 1750 hPa lassen sich auf den Freiblasstrom zurückführen.

Ein Ausschnitt aus dem aufgezeichneten Gesamtdruckverlauf mit Werten bis 200 hPa soll die Problematik noch einmal verdeutlichen:

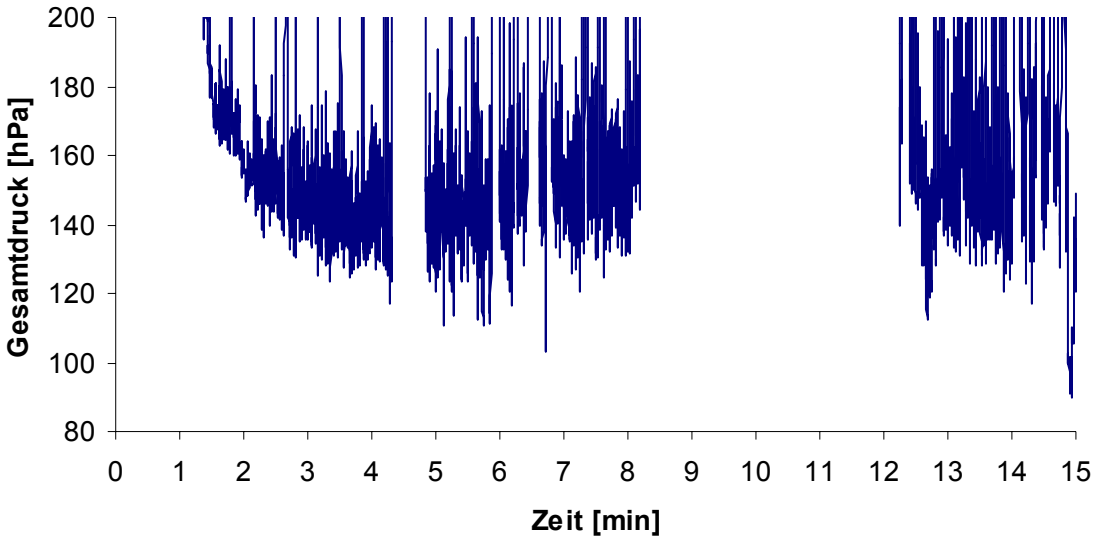


Abbildung 5-39: Ausschnitt aus dem zeitlichen Verlauf des Gesamtdrucks bei einer Förderrate von 3,49 g/min der Modellsubstanz Criscarb®, Mahldruck $4{,}0 \cdot 10^5$ Pa, Injektordruck $4{,}5 \cdot 10^5$ Pa, Mahlspalt 5 mm, Radius 35,5 mm, Position 4, Eintauchtiefe des Pitot-Rohres 6 mm, Anströmwinkel -5°, Ebene (+1), Spülgasdruck $1{,}75 \cdot 10^5$ Pa, 15 min

Die neben den Druckspitzen unregelmäßig auftretenden hohen Oszillationen des Gesamtdrucks erstrecken sich über einen Bereich von mehr als 50 hPa, wie Abbildung 5-39 veranschaulicht.

In weiteren Messungen wird der Vordruck des Spülgasstroms schrittweise bis auf $3{,}25 \cdot 10^5$ Pa erhöht und das Freiblasintervall bis auf 3 Sekunden verkürzt. Die Versuche zeigen deutlich, dass sich das Pitot-Rohr immer wieder mit Pulver zusetzt und nicht vollständig freigeblasen wird. Auf Grund der zahlreichen Druckinstabilitäten kann ferner die Strömungsrichtung nicht eindeutig angegeben werden. Zudem ist eine genaue Bestimmung der Basislinie bzw. eine Mittelwertberechnung des Gesamtdrucks über einen Zeitraum von mehreren Minuten nicht sinnvoll und aussagekräftig.

Diese Ergebnisse lassen daher den Schluss zu, dass eine exakte Gesamtdruckaufnahme mittels Pitot-Rohr bei Feststoffzusatz der Spiralstrahlmühle nicht möglich ist. Die starken Druckschwankungen und Unregelmäßigkeiten erlauben keine reproduzierbare Messwerterfassung.

Um die Untersuchungen zum Strömungsverhalten bei beladener Strahlmühle weiter fortzuführen, ist demnach eine andere Methode zur Geschwindigkeitsmessung, vgl. Kapitel 4.2.1.5, auszuwählen. Dies erfordert jedoch einen erheblichen apparativen Umbau der gesamten Versuchsanlage.

6 Zusammenfassung

Der Untersuchung des Strömungsverhaltens in einer Spiralstrahlmühle kommt auf Grund ihrer Komplexität besondere Bedeutung zu. Seit der Entwicklung der Strahlmühlen wird versucht, die Abläufe während des Zerkleinerungsprozesses genau zu beobachten und zu analysieren. Die aufgestellten Modelle reichen jedoch nur bedingt aus, um ein umfassendes Verständnis der Strömungsvorgänge zu ermöglichen. Als Kontrollinstrument der Betriebszustände in der Mühle hat sich die Aufzeichnung des statischen Drucks etabliert [4, 43, 49, 66]. Dazu wird ein piezoresistiver Druckaufnehmer in den Mahlkammerdeckel eingebaut und der statische Druckverlauf aufgezeichnet. An Hand der erhaltenen Kennlinien kann leicht festgestellt werden, ob stabile Druck- und damit Strömungsvorgänge in der Mahlkammer erreicht sind. Treten jedoch starke Druckschwankungen auf, ist von instabilen Strömungszuständen auszugehen mit der Folge, dass die eingebrachte Energie nicht effektiv genutzt wird und die Zerkleinerung der Partikel daher unzureichend erfolgt. Dementsprechend müssen die Mahlbedingungen, also die operativen Parameter, angepasst werden.

Für weitergehende Untersuchungen des Strömungsverlaufs in der Spiralstrahlmühle ist eine derartige Messvorrichtung nicht geeignet. Eine Vielzahl an gängigen Verfahren der Druck- und Strömungsmesstechnik scheidet zudem aus, da sie sich auf Grund der Geometrie der eingesetzten Luftstrahlmühle vom Typ Fryma JMRS 80 nicht realisieren lassen. Um auch in innere Bereiche der Mühle vorzudringen, ist für die vorliegende Arbeit eine neue Methode zur Druck- bzw. Geschwindigkeitsmessung auszuwählen. Eine sinnvolle Möglichkeit stellt die Erfassung des Gesamtdrucks mittels Staurohr dar. Bei Kenntnis des statischen Drucks wird mit Hilfe der “kompressiblen Bernoulli-Gleichung“ die lokale Geschwindigkeit der Strömung ermittelt. Für die Aufzeichnung des statischen Drucks kann das bereits von Rief [66] und Marquardt [43] erfolgreich eingesetzte Messsystem mit Drucksensor XT 190 M der Firma Kulite genutzt werden.

An Hand der durchgeführten Versuchsreihen zeigt sich, dass der statische Druck auf gleichem Radius unabhängig von der Position des Druckaufnehmers und damit auch unabhängig vom Einfluss der Treibstrahlen über der Wandschicht fast konstant ist. Weitere Untersuchungen des statischen Drucks über dem Radius der Mahlkammer bringen den Beweis, dass die aufgenommene radiale Druckkennlinie vom äußeren Mahlkammerrand in Richtung des Kammermittelpunktes abfällt, so wie es für Spiralströmungen erwartet wird [43, 52].

Die Aufnahme des zur Geschwindigkeitsberechnung benötigten Gesamtdrucks erfolgt über ein Pitot-Rohr, welches über ein Distanzrohr mit dem Druckaufnehmer D 10 der Firma WIKA verbunden ist. Dazu muss zunächst ein für die Mühle geeignetes Pitot-Rohr angefertigt werden, um zuverlässige, reproduzierbare Messergebnisse zu erhalten. In der Literatur ist für die Konstruktion des Staurohres kein einheitliches Design vorgegeben, es finden sich nur zahlreiche Fertigungshinweise [46, 56, 57, 81, 84]. Daher werden verschiedene Messrohre zu Vergleichszwecken konstruiert. Schon bei minimaler geometrischer Änderung zeigen sich deutliche Unterschiede in den aufgenommenen Gesamtdruckwerten. Das Pitot-Rohr mit einer Kopflänge von 13 mm und einem Verhältnis von Innendurchmesser zu Außendurchmesser von 0,73 liefert in Vergleichsmessungen die höchsten Gesamtdruckwerte und wird daher für die weiteren Versuche eingesetzt. Diese erfolgen bei konstant gehaltenen operativen Parametern zunächst ohne Feststoffbeladung der Spiralstrahlmühle, um erste Orientierungswerte für die aufgezeichneten Drücke und die daraus berechneten Geschwindigkeiten zu erhalten.

Um den Innenraum der Mühle so vollständig wie möglich zu erfassen, werden wesentliche Einflussgrößen, wie Messposition und Eintauchtiefe des Pitot-Rohres sowie definierte radiale Positionen in der Mahlkammer schrittweise variiert. Dabei erfolgt jeweils die Ermittlung des optimalen Anströmwinkels des Pitot-Rohres. Nur in diesem Fall ist das Rohr exakt in der Strömung positioniert und kann direkt angeströmt werden, erkennbar am Auftreten eines maximalen Gesamtdruckwertes. Der Einfluss der veränderten Parameter wird am Beispiel des höchsten gemessenen Gesamtdruckwertes von 898 hPa und einer damit berechneten Geschwindigkeit von 248 m/s erläutert.

Versuche mit unterschiedlichen Eintauchtiefen des Pitot-Rohres in die Mahlkammer zeigen ebenfalls einen Druckanstieg, sobald das Messrohr in Nähe der Treibstrahldüsen ausgerichtet wird. Dieser Einfluss ist nur in der Mahlkammerperipherie auf dem Radius von 35,5 mm klar erkennbar. Als sehr aufschlussreich erweisen sich darüberhinaus Messungen des Gesamtdrucks in Abhängigkeit von der Position des Pitot-Rohres in den Treibstrahlebenen. Je weiter sich das Rohr von der Treibstrahldüse entfernt, desto niedriger sind aufgenommener Gesamtdruck und die daraus resultierende Geschwindigkeit. Dieser Aspekt lässt sich besonders an Hand einer Projektion der über die Mahlkammer verteilten Messpositionen zwischen zwei Düsen verdeutlichen.

Die berechneten Geschwindigkeitswerte lassen sich mit Hilfe des Programms MATLAB® graphisch in Strömungsprofilen darstellen. So können besonders übersichtlich Richtung und Geschwindigkeit der lokalen Strömung in Abhängigkeit vom Radius der Mahlkammer und Position des Pitot-Rohres veranschaulicht werden. Um die Wölbung des Mahlkammerdeckels ebenfalls an jedem Messpunkt zu berücksichtigen, wird in den Strömungsprofilen nicht die gemessene Eindringtiefe des Pitot-Rohres angegeben, sondern die absolute Eintauchtiefe des Rohres in Bezug zu der durch die Mittelpunkte der Treibstrahldüsen gebildeten Ebene. Auf diese Weise lässt sich der Strömungsverlauf in der Strahlmühle schichtweise in einzelnen Ebenen angeben. Von großer Bedeutung sind die Treibstrahlebenen sowie angrenzende Bereiche ober- bzw. unterhalb der Treibstrahlebenen, da hier ein symmetrisches Strömungsverhalten beobachtet werden kann. Diese Symmetrie wird jedoch in den nachfolgenden Ebenen, bedingt durch das Tauchrohr, durchbrochen.

Auf Grund der Geometrie von Mahlkammer und Pitot-Rohr kann an einigen Positionen, darunter auch innerhalb des Tauchrohres, keine Gesamtdruckaufnahme erfolgen. Trotzdem reichen die ermittelten Geschwindigkeiten aus, um ein eindeutiges Bild der Strömung zu erhalten. Der charakteristische Verlauf einer Spiralströmung kann mit Hilfe der durchgeführten Druckmessungen bestätigt werden. In der Mahlkammerperipherie verläuft die Strömung entlang des Umfangs, doch bereits ab dem Radius 26,5 mm nimmt die radiale Komponente zu, so dass die Vektoren zur Mitte der Mahlkammer zeigen. Dieser Bereich beschreibt die umlaufende Grundströmung, deren Geschwindigkeit durchschnittlich niedriger als die der von Treibstrahlen dominierten Positionen ist. Innerhalb der Sichtzone, in Richtung des Tauchrohres, steigt die ermittelte Geschwindigkeit an, wie es für eine Spiralströmung typisch ist [52].

Das geläufige “Drei-Ebenen-Modell“ von Kürten und Rumpf [36] zur Darstellung der Strömungsverläufe in der Strahlmühle kann an Hand der gewonnenen Erkenntnisse nicht bestätigt werden. Die vermuteten Rückströmungen lassen sich trotz Ausrichtung des Pitot-Rohres in verschiedenen Eintauchtiefen sowie an veränderten Positionen der Mahlkammer nicht beobachten.

Zur Prüfung der Empfindlichkeit des eingesetzten Pitot-Rohres wird der maximale Fehler quantifiziert. Die angeführte Fehlerberechnung zeigt deutlich, dass bei hohen Geschwindigkeiten unter Beachtung der Messungenauigkeiten der verwendeten Druckaufnehmer von einer maximalen Abweichung der Strömungsgeschwindigkeit von

ca. 4 % auszugehen ist. Diese Messmethode ist somit ausreichend genau, um mit Hilfe der aufgenommenen Druckwerte ein Strömungsprofil der Strahlmühle zu erstellen.
Weiterhin wird die Frage geklärt, wie weit der Treibstrahl in die Mahlkammer eindringt. Unter Zuhilfenahme von Seitenlängen- und Winkelbeziehungen in einem Dreieck zeigt ein beispielhaft ausgewählter Strömungsvektor auf dem Radius 26,5 mm, dass der Treibstrahl bereits nach einer maximalen Eindringweite von 13 mm seine ursprüngliche Geschwindigkeit verloren und die Geschwindigkeit der Grundströmung, in diesem Fall von 75 m/s, angenommen hat.
Ferner wird der Einfluss erhöhter Mahlenergie auf die Druck- sowie Geschwindigkeitswerte untersucht. Bei schrittweiser Erhöhung des vorgegebenen Mahldrucks von $4{,}0 \cdot 10^5$ Pa auf $5{,}5 \cdot 10^5$ Pa steigt sowohl der statische als auch der Gesamtdruck nahezu linear an. Die weitere Erhöhung des Mahlgasvordrucks auf $6{,}0 \cdot 10^5$ Pa führt jedoch nicht mehr zu einem deutlichen Anstieg des Gesamtdrucks, was sich auf die maximale Belastung des Pitot-Rohres bei dem gewählten Mahldruck zurückführen lässt.
Für die Versuche mit Pulverbeladung der Mühle ist es notwendig, zunächst einen konstanten Feststoffdurchsatz zu bestimmen, bei dem stabile Betriebsbedingungen der Strahlmühle gewährleistet sind. Dazu werden Mahlvorgänge mit veränderter Förderrate des Gutes durchgeführt. Es zeigt sich, dass bei einer Förderrate von 3,49 g/min die statischen Druck- und damit Strömungsverhältnisse über eine Messdauer von 10 Minuten stabil sind. Mit dieser Einstellung werden anschließend statische Druckverläufe in Abhängigkeit von der Position des Druckaufnehmers aufgezeichnet. Ein Einfluss der Treibstrahlen auf die statischen Druckwerte ist auch hier nicht erkennbar, wie bereits in den Untersuchungen ohne Feststoffbeladung bewiesen.
Bei Erhöhung des Mahlgasdrucks steigt der statische Druck an den äußeren Mahlkammerradien linear an. Die Bestimmung der Partikelgrößenverteilung und Auswertung mittels RRSB-Netz dient dabei zur Überprüfung eines erfolgreichen Zerkleinerungsprozesses. Je höher der angelegte Mahldruck, desto feinkörniger und enger verteilt ist das erhaltene Mahlprodukt, wie Vergleiche von Lageparameter und Gleichmäßigkeitszahl sowie der Mediane zeigen.
Die Aufzeichnung des Gesamtdrucks bei Feststoffbeladung verläuft hingegen nicht erfolgreich. Durch die Ausrichtung in Strömungsrichtung setzt sich das Pitot-Rohr schnell mit Pulverpartikeln zu, die sich trotz regelmäßiger Freiblasstöße nicht entfernen lassen. Dieser Effekt kann durch Erhöhung des Vordrucks sowie ein verkürztes Intervall

des Spülgasstroms nicht vermieden werden. Es treten starke Druckschwankungen und zahlreiche Strömungsinstabilitäten auf, die eine reproduzierbare Gesamtdruckerfassung selbst über eine kurze Messdauer und damit eine genaue Berechnung der Geschwindigkeit nicht erlauben.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Messungen mittels Pitot-Rohr eine geeignete Methode zur Ermittlung des Gesamtdrucks in reinen Gasströmungen darstellen. Aus diesen Messergebnissen kann der Strömungsverlauf in der Luftstrahlmühle wiedergegeben werden, der dem einer Spiralströmung exakt entspricht.

7 Summary

Investigations of the flow in a spiral jet mill demand particular importance due to its complexity. Since the development of these mills began, numerous studies have aimed at improving understanding of flow processes during particle comminution. But established models do not yet completely comprise mechanisms of the occurring stream processes.

Monitoring the static pressure represents a well suitable method of controlling operating conditions in the mill. For this purpose a piezo-resistive pressure transducer has to be fitted into the covering of the milling chamber and static pressure profiles are recorded. By means of the obtained characteristic curves, stable pressure and resultant flow conditions in the mill can easily be surveyed. The appearance of high pressure fluctuations caused by an unstable stream indicates insufficient particle comminution and so an ineffective consumption of the injected energy. Thus, the settings of the operational parameters have to be adapted properly to avoid such instabilities.

Further research on the flow in the spiral jet mill requires more appropriate equipment. Due to the small geometric dimensions of the used jet mill (type Fryma JMRS 80) a multitude of current techniques measuring pressure and flow conditions has to be rejected. Hence, with the objective of reaching even inner planes of the jet mill a new method of analysing pressure and stream processes has to be chosen for the present work. Instead, recording the total pressure by means of a pitot tube is suitable as an effective possibility. Knowing the static pressure, the local velocity of the flow can easily be calculated using the “compressible Bernoulli Equation”. According to Rief and Marquardt the pressure transducer XT 190 M, Fa. Kulite, succeeds accurately in recording these essential static pressure data.

Several experiments indicate that the static pressure remains nearly constant over the same jet mill radius and is dependent neither on the position of the pressure transducer nor on the influence of the jets. Further investigations of the static pressure against the radius prove the pressure decreases from circumferential radii towards the middle of the milling chamber, as expected for spiral jet streams.

Recording total pressure values for subsequent calculating flow velocities requires a pitot tube next in line to a pressure transducer D 10, Fa. WIKA, both connected with a distance tube. Accordingly, an appropriate pitot tube for the jet mill has to be constructed yielding reliable and reproducible data. Comprehensive constructing advice can be

taken from literature, but not a standardized probe design. To this end pitot tubes varying in their dimensions are made for reasons of comparison. Even minimal changes in geometry lead to significant differences in the recorded pressure values. The pitot tube with a tip length of 13 mm and a ratio of inner to outer diameter of 0,73 provides the highest total pressure data in comparative tests. Hence it will be used in the following research setting the operational parameters at a constant level. These experiments are first run without feeding material in order to obtain initial data for pressure and velocity. Evaluating the total pressure in inner planes of the jet mill as completely as possible, essential parameters such as position and immersion depth of the pitot tube as well as defined radii of the milling chamber are varied step by step. At each measuring point the optimal direction angle of the probe has to be explored carefully. Only in this case is the pitot tube perfectly aligned into the flow and can meet the stream frontally, creating maximum total pressure data. The influence of those varied parameters is detailed exemplified by the highest occurring total pressure value of 898 hPa and thus a calculated velocity of 248 m/s.

Experiments run with different immersion depths of the pitot tube in the milling chamber also show pressure data increasing when the probe is aligned near the jet nozzles. Only at circumferential radii of 35,5 mm can be this influence properly detected. Moreover, measurements of the total pressure depending on the position of the tube in the nozzle plane contribute valuable information. The further the probe is removed from the jet nozzle the lower are the monitored total pressure and the resultant velocity. Projecting the measuring points spread over the milling chamber between two jet nozzles illustrates this effect quite clearly.

With the help of the program MATLAB® the calculated velocity data are visualised graphically as stream profiles. Thus direction and velocity of the local flow can be illustrated particularly clearly subject to the radius of the milling chamber as well as to the position of the pitot tube. Considering also the arched covering of the jet mill at each measuring point, the absolute instead of the measured immersion depth of the probe in the milling chamber is specified in relation to the plane, spanned by the middle of the jet nozzles. Thus the flow in the jet mill can be subdivided in layers into separate planes. Appearing of symmetric flow properties the nozzle plane itself as well as following planes above and below this plane, respectively, demand great importance. Because of the classification tube this symmetric flow behaviour cannot further be detected in adjacent planes.

Due to the geometric dimensions of both the jet mill and the pitot tube, monitoring the total pressure at some positions such as inside the classification tube does not succeed. Nevertheless, the velocities measured suffice to characterise precisely the flow in the jet mill. These pressure measurements apparently confirm the typical profile of a spiral jet stream. At the periphery mill radii the stream follows the circumference but at radius 26,5 mm the radial component of the flow already increases leading the direction of the vectors towards the middle of the milling chamber. This zone can be characterised by the circulating main stream, its average velocity is lower than velocities at positions near by jet nozzles. Within the classification zone, i.e. towards the classification tube, the velocity measured increases as is typical of spiral jet streams.

Based on the measured data, the common “Drei-Ebenen-Modell” by Kürten and Rumpf describing flow processes in a jet mill cannot be confirmed. The backstreaming in the jet nozzle plane proposed in this model is not observable not even by placing the probe at different immersion depths and modified positions in the milling chamber.

In order to characterise the sensitivity of the pitot tube used the maximum error is quantified. Analysing these errors shows clearly that at high velocities a deviation in flow velocities of approximately 4 per cent has to be assumed, also considering measuring inaccuracies of the used pressure transducers. Hence, this method is sufficiently precise to generate a stream profile of the jet mill by recording total pressure values.

Furthermore the question of how far the jet enters the milling chamber is answered. With the help of angle and side length relations in a triangle an exemplarily chosen stream vector of plane (-1) at radius 26,5 mm illustrates the jet losing its original velocity after a penetration width of 13 mm and adapting to the velocity of the main stream, in this case to 75 m/s.

Moreover, the influence of increasing grinding energy on pressure and velocity data was investigated. Raising the milling gas pressure gradually from $4{,}0 \cdot 10^5$ Pa to $5{,}5 \cdot 10^5$ Pa, the static as well as the total pressure increase nearly linearly. However, further heightening to $6{,}0 \cdot 10^5$ Pa does not yield a significant raise of the total pressure, due to the maximum load of the pitot tube at this gas pressure setting.

It is then necessary to establish a constant feed rate guarantying stable flow conditions while loading the jet mill with solid material. To this end several comminution processes are carried out with varying powder supply at different settings. Over a period of 10 minutes a feeding rate of 3,49 g/min leads distinctly to stable pressure and resultant stream conditions. With this setting all further static pressure profiles are recorded while

the position of the pressure transducer is varied. An influence of the jet nozzles on the static pressure values does not become apparent as already demonstrated in preceding tests without feed.

When the milling gas pressure is raised, the static pressure at circumferential radii also increases linearly. Hereby the determination of particle size distributions and analysis by the use of a RRBS-Netz serves as a check for successful grinding processes. Comparing as well location and dispersion parameters as medians of the ground material indicates that the higher the adjusted milling gas pressure is, the finer and tighter-distributed is the received comminution product.

In contrast to these static pressure measurements, it is not possible to monitor total pressure profiles without difficulties. Aligning the pitot tube directly into the gas-solid stream causes fast blocking of the probe´s tip with fine particles. In spite of pulsating air blasts the pitot tube cannot be freed from this clogging. Neither an increase of the milling gas pressure nor the purgation gas pulsing for shortened-time intervals have cleaning effects on the probe. The appearance of enormous pressure fluctuations and high flow instabilities do not enable reproducible measurements of the total pressure even over a short length of time nor of correct calculations of local velocities.

All in all the pitot tube represents an appropriate method of evaluating total pressure values without particle load. The measured data render stream profiles for every plane of the jet mill, each corresponding exactly to a spiral stream profile.

8 Literaturverzeichnis

[1] Abramowitsch, G.: Angewandte Gasdynamik, VEB-Verlag-Technik, Berlin, 1958

[2] Ahlbus, F. E.: Fluid energy grinding or jet mill grinding, Advanced Powder Technology, 3, 1992, 273 - 284

[3] Bauer, B.: Auslegung von Strahlapparaturen für beliebige Medien, Dissertation, TH Stuttgart, 1965

[4] Bauer, V.: Experimentelle und theoretische Betrachtungen der Strömungsverläufe in Bezug auf die Sichtwirkung und Zerkleinerungsvorgänge in der Spiralstrahlmühle, VDI Fortschritt-Bericht, Reihe 3, Nr. 589, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1999

[5] Benz, M., et al.: Performance of a fluidized bed jet mill as a function of operating parameters, Int. J. Min. Process., 44 - 45, 1960, 507 - 519

[6] Bohl, W.: Technische Strömungslehre, 11. Auflage, Vogel Buchverlag, Würzburg, 1998

[7] Busmann, F.: Strömungsmessungen bei eben und räumlich gekrümmten Strombahnen, ATM, Blatt V 116 - 1, 1933

[8] DIN 66145: RRSB-Netz zur Darstellung von Korn- (Teilchen-) größenverteilungen, 1976-04

[9] Escher, H.: Flow Measurement with the Pitot Tube, Commonwealth Engineer, 28, Nr. 2, 1940, 54 - 60

[10] Eskin, D., Voropayev, S., Vasilkov, O.: Simulation of jet milling, Powder Technology, 105, 1999, 257 - 265

[11] Firma Coulter Electronics Inc.: Referenzhandbuch Coulter® LS 230, Miami, USA, 1997

[12] Firma Esco-Labor AG: Produktinformation Luftstrahlmühle JMRS 80 SQ, Riehen, Schweiz

[13] Firma Grainsoft GmbH: PMPcompact®, Software für die mechanische Verfahrenstechnik, Version 3.1, Benutzerhandbuch, Freiberg, 1998

[14] Firma Isel-Electronic: Schrittmotore und Schrittmotorantriebe, Systembeschreibung, Elektronik Mechanik Galvanik, Eiterfeld, 1986

[15] Firma Kobold: Bedienungsanleitung Digital-Manometer, Typ MAN SF 26, Hofheim, 1997

[16] Firma Kulite: Datenblatt Druckaufnehmer XT 190 M, Hofheim, 2005

[17] Firma E. Merkle GmbH: Technisches Sicherheitsdatenblatt Criscarb® V 130, Blaubeuren, 2005

[18] Firma WIKA: Betriebsanleitung P-1X, D-1X, Klingenberg, 2002

[19] Firma WIKA: Datenblatt PE 81.33, Elektronische Druckmesstechnik D-1X, Klingenberg, 2004

[20] Folsom, R. G.: Review of the pitot tube, Transactions of the American Society of Mechanical Engineers, 78, 1956, 1447 - 1458

[21] Gersten, K.: Einführung in die Strömungsmechanik, Shaker Verlag, Aachen, 2003

[22] Giersiepen, G.: Maschinen und Apparate für die Feinstzerkleinerung, Aufbereitungstechnik, 1973, 277 - 284

[23] Gommeren, H. J. C., et al.: Dynamic modelling of a closed loop jet mill plant, Int. J. Miner. Process., 44 - 45, 1996, 497 - 506

[24] Gommeren, H. J. C., et al.: Modelling and control of a jet mill plant, Powder Technology, 108, 2000, 147 - 154

[25] Gracey, W.: Wind-tunnel investigation of a number of total-pressure tubes at high angles of attack, subsonic, transonic and supersonic speeds, NACA, Technical Note, 3641, Report 1303, 1956, 495 - 504

[26] Grassmann, P.: Physikalische Grundlagen der Verfahrenstechnik, Salle und Sauerländer Verlag, Frankfurt, Aarau, 1983

[27] Grosser, W. I.: Factors influencing pitot probe centerline displacement in a turbulent supersonic boundary layer, NASA Technical Memorandum, 107341, Cleveland, Ohio, 1997

[28] Haese, U.: Bedeutung der Strahlmühlen für die Lebensmittelindustrie steigt fortlaufend, Zeitschrift Maschinenmarkt, 88, 1982, 866 - 869

[29] Hearing, E. A.: Airdata Measurement and Calibration, NASA Technical Memorandum 104316, Edwards, California, 1995

[30] Herwig, H.: Strömungsmechanik A-Z, Vieweg Verlag, Wiesbaden, 2004

[31] Kaiser, F., Nied, R.: Moderne Strahlmühlen, Aufbereitungstechnik, Nr. 10, 1980, 507 - 514

[32] Kalman, H., et al.: Fatigue behaviour of impact comminution and attriction units, Powder Technology, 146, 2004, 1 - 9

[33] Klopfenstein, R.: Air velocity and flow measurement using a Pitot Tube, ISA Transactions, Volume 37, Issue 4, 1998

[34] Kretzler, K.: Programm zur Messwerterfassung an der Luftstrahlmühle, Würzburg, 2000

[35] Kürten, H., Rink, N., Rumpf, H.: Strömung und Zerkleinerung beim Stoß zweier Gas-Feststoff-Strahlen, Powder Technology, Band 4, 1970/71, 221 - 231

[36] Kürten, H., Rumpf, H.: Strömungsverlauf und Zerkleinerungsbedingungen in der Spiralstrahlmühle, Chem.-Ing.-Technik, 38, Nr. 11, 1966, 1187 - 1192

[37] Kürten, H., Rumpf, H.: Zerkleinerungsuntersuchungen mit tribolumineszierenden Stoffen, Chem.-Ing.-Technik, 38, Nr. 11, 1966, 331 - 342

[38] Kürten, H.: Über die Tribolumineszenz als Mittel zur quantitativen und qualitativen Analyse von Zerkleinerungsvorgängen und ihre Anwendung zur Untersuchung der Strahlmahlung, Dissertation, TH Karlsruhe, 1965

[39] Leschonski, K.: Prallmahlung in einer Sichtermühle unter Nutzung des gegenseitgen Teilchenstoßes, Chem.-Ing.-Technik, 42, Nr. 6, 1970, 264 - 269

[40] Lieberman, H. A., Lachman, L.: Pharmaceutical Dosage Forms: Tablets, Vol. 2, M. Decker Verlag, New York, 1981

[41] Löffler, F., Raasch, J.: Grundlagen der mechanischen Verfahrenstechnik, Vieweg Verlag, Braunschweig Wiesbaden, 1992

[42] Mahrenholtz, J.: Online-Messungen der Partikelgröße in der pneumatischen Förderung hinter einer Luftstrahlmühle, Diplomarbeit, TU Clausthal, 1996

[43] Marquardt, K.: Untersuchungen zum Zerkleinerungsverhalten kristalliner Stoffe in einer Spiralstrahlmühle, Dissertation, Universität Würzburg, 2004

[44] Mebtoul, M., et al.: High velocity impact of particles on a target - an experimental study, Int. Journ. Mineral. Process., 44 - 45, 1996, 77 - 91

[45] Meier, M.: Programm zur graphischen Darstellung der Strömungsprofile mittels MATLAB® (The MathWorks, USA), Zentrum für Angewandte Energieforschung, Würzburg, 2006

[46] Merriam, K. G., Spaulding, E. R.: Comparative Tests of Pitot-Static Tubes, NACA Technical Note, No. 546, Washington, 1935

[47] Midoux, N., et al.: Micronisation of pharmaceutical substances in a spiral jet mill, Powder Technology, 104, 1999, 113 - 120

[48] Miller, R. W.: Flow measurement engineering handbook, 3th Edition, McGraw-Hill, New York, 1996

[49] Müller, F., Polke, R., Schädel, G.: Spiral jet mills: hold up and scale up, Int. Journ. Miner. Process., 44 - 45, 1996, 315 - 326

[50] Muschelknautz, E.: Untersuchungen an Fliehkraftabscheidern, Chem.-Ing.-Technik, 39, 6/7, 1967, 306 - 310

[51] Muschelknautz, E., Brunner, K.: Untersuchung an Zyklonen, Chem.-Ing.-Technik, 39, 9/10, 1967, 531 - 538

[52] Muschelknautz, E., Giersiepen, G., Rink, N.: Strömungsvorgänge bei der Zerkleinerung in Spiralstrahlmühlen, Chem.-Ing.-Technik, 42, Nr. 1, 1970, 6 - 15

[53] Muschelknautz, E., Rink, N.: Neuere Untersuchungen an Strahlmühlen, Verfahrenstechnik, 5, Nr. 6, 1971, 225 - 230

[54] Neemeh, R., AlGattus, S.: Experimental investigation of noise reduction in supersonic jets due to jet rotation, Journal of Sound and Vibration, 221, Nr. 3, 1999, 504 - 524

[55] Nied, R.: Strahlmahlung in der Fließbettgegenstrahlmühle, TIZ-Fachberichte, Vol. 109, Nr. 1, 1985

[56] Nitsche, W.: Strömungsmesstechnik, Springer Verlag, Berlin Heidelberg New York, 1994

[57] Ower, E., Johansen, F. C.: The design of pitot-static tubes, Reports and Memoranda, No. 981, 1925, 985 - 995

[58] Ower, E., Pankhurst, R. C.: The Measurement of Air Flow, 5th Edition, Pergamon Press, Oxford, 1977

[59] Pahl, M.: Zerkleinerungstechnik, TÜV Rheinland, Fachbuchverlag Leipzig, 2. Auflage, 1993

[60] Papula, L.: Mathematik für Ingenieure, Vieweg Verlag, Wiesbaden, 6. Auflage, 1991

[61] Prandtl, L., Oswatitsch, K., Wieghardt, K.: Führer durch die Strömungslehre, 9. Auflage, Vieweg Verlag, Braunschweig, 1990

[62] Priemer, J.: Untersuchungen zur Prallzerkleinerung von Einzelteilchen, Dissertation, TH Karlsruhe, 1964

[63] Rajendran Nair, P. B., Ramanujam, M.: Fluid energy grinding, Advanced Powder Technology, Vol. 3, Nr. 4, 1992, 273 - 284

[64] Ramanujam, M., Venkateswarlu, D.: Studies in fluid energy grinding, Powder Technology, 3, 1969/70, 92 - 101

[65] Richard, H. A.: Bruchvorhersagen bei überlagerter Normal- und Schubbeanspruchung von Rissen, VDI-Forschungsheft, Nr. 631, 1985, 1 - 60

[66] Rief, F.: Untersuchungen zum Betriebszustand einer Spiralstrahlmühle, Dissertation, Universität Würzburg, 2001

[67] Rink, N., Giersiepen, G.: Feinzerkleinern in der chemischen Industrie, Aufbereitungstechnik, Nr. 9, 1971, 562 - 572

[68] Rumpf, H.: Beanspruchungstheorie der Prallzerkleinerung, Chem.-Ing.-Technik, 31, Nr. 5, 1959, 323 - 337

[69] Rumpf, H.: Physikalische Aspekte des Zerkleinerns, Ähnlichkeitsgesetz der Bruchmechanik und die Energieausnutzung der Einzelkornzerkleinerung, Aufbereitungstechnik, Nr. 2, 1973, 59 - 71

[70] Rumpf, H.: Prinzipien der Prallzerkleinerung und ihre Anwendung bei der Strahlmahlung, Chem.-Ing.-Technik, 32, Nr. 3, 1969, 129 - 137

[71] Salman, A. D., et al.: Particle Impact Breakage in Particulate Processing, KONA, No.21, 2003, 88 - 98

[72] Schädel, G.: Eine neue Möglichkeit für die Maßstabsvergrößerung von Spiralstrahlmühlen, Bericht 182.0272.0, Technische Entwicklung, Verfahrenstechnik, D-DET/SZ, BASF AG, 1982

[73] Schäfer, W., Sommer, K.: Influences of dispersion and convection during grinding on the solid distribution in a spiral-type jet mill, 1st World Congress Particle Technology, Nürnberg, Part II, Comminution, 1986, 325 - 341

[74] Schlag, H.-P.: Experimentelle und theoretische Untersuchungen der Kennlinien von gasbetriebenen Einphaseninjektoren und Gutaufgabeinjektoren, Reihe 3, Nr. 313, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1992

[75] Schönert, K, Steier, K.: Die Grenze der Zerkleinerung bei kleinen Korngrößen, Chem.-Ing.-Technik, 43, Nr. 13, 1971, 773 - 777

[76] Schönert, K.: Die Partikelzerstörung als Elementarprozess des Zerkleinerns, Acta Pharmaceutica Technologica, APV-Informationsdienst, Supplement 6, DAV-Verlag, Stuttgart, 1978, 5 - 23

[77] Siekmann, H. E.: Strömungslehre, Springer Verlag, Berlin, 2000

[78] Stiess, M.: Mechanische Verfahrenstechnik 2, Springer Verlag, Berlin Heidelberg New York, 1994

[79] Tuunilla, R., Nyström, L.: Effects of grinding parameters on product fineness in jet mill grinding, Minerals Engineering, 11, 1998, 1089 - 1094

[80] Van Ommen, J. R., et al.: Response characteristics of probe-transducer systems for pressure measurements in gas-solid-fluidized beds: how to prevent pitfalls in dynamic pressure measurements, Powder Technology, 106, 1999, 199 - 218

[81] Vinnemeier, F.: persönliche Mitteilung, Laboratorium für Strömungsmaschinen, Hochschule für Angewandte Wissenschaften, Hamburg, 07/ 2004

[82] Voropayev, S., Eskin, D.: Optimal particle acceleration in a jet mill nozzle, Minerals Engineering, 15, 2002, 447 - 449

[83] Weichert, R.: Anwendung von Fehlstellenstatistik und Bruchmechanik zur Beschreibung von Zerkleinerungsvorgängen, Zement-Kalk-Gips, Nr. 1, 45. Jahrgang, 1992

[84] Wüst, W.: Strömungsmesstechnik, Vieweg Verlag, Braunschweig, 1969

[85] Yoon, S. H.: Scale-up method for a horizontal-type jet mill, Advanced Powder Technology, Vol. 5, Nr. 1, 1994, 53 - 59

[86] Zimmermann, I.: Pharmazeutische Technologie-Industrielle Herstellung und Entwicklung von Arzneimitteln, Springer Verlag, Berlin Heidelberg New York, 1998

[87] Zogg, M.: Einführung in die mechanische Verfahrenstechnik, B. G. Teubner Verlag, Stuttgart, 1993

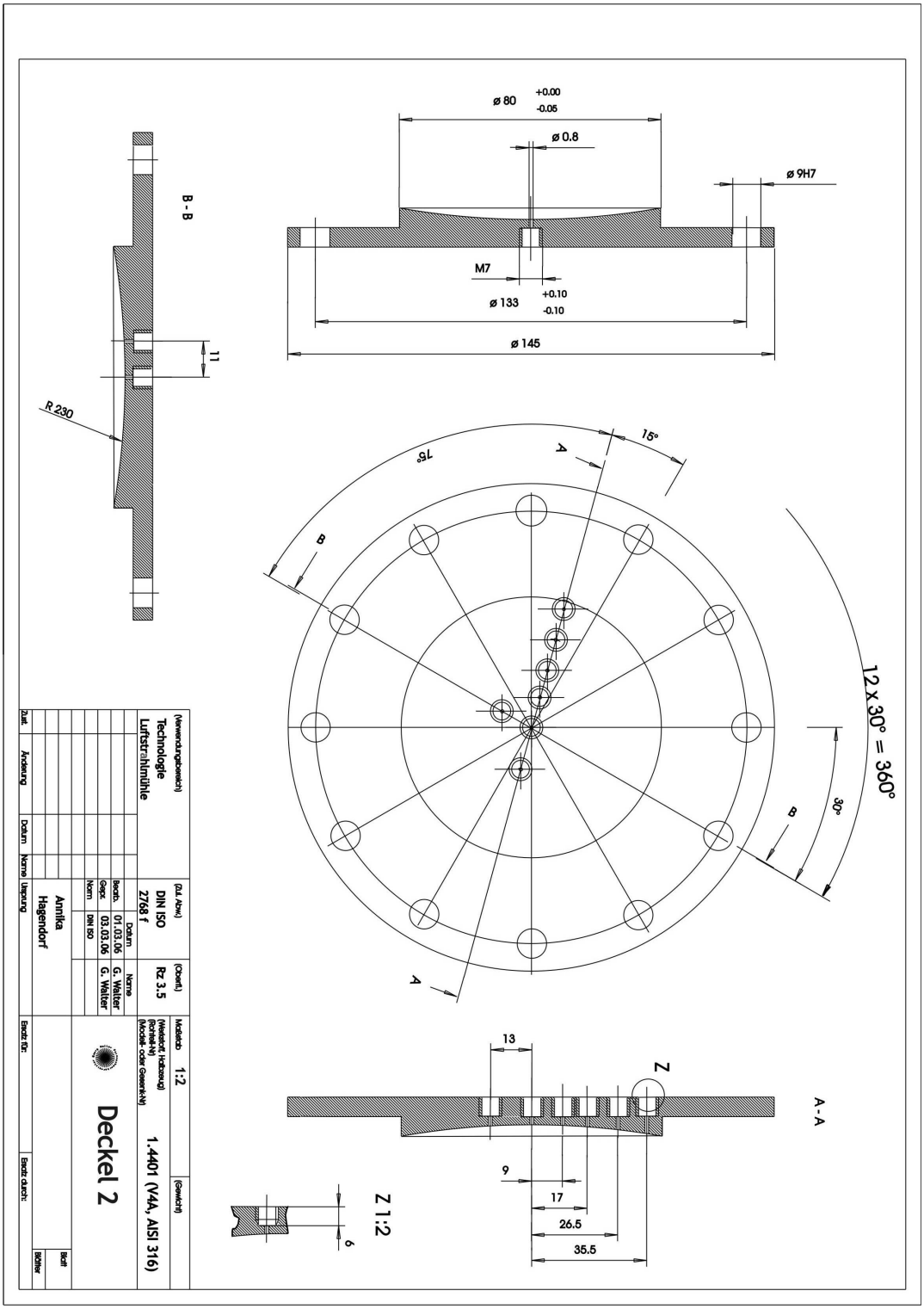
[88] Zügner, S., Marquardt, K., Zimmermann, I.: Influence of nanomechanical crystal properties on the comminution process of particulate solids in spiral jet mills, European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics, 62, 2006, 194 - 201

[89] Zügner, S.: Untersuchungen zum elastisch-plastischen Verhalten von Kristalloberflächen mittels Kraft-Eindringtiefen-Verfahren, Dissertation, Universität Würzburg, 2002

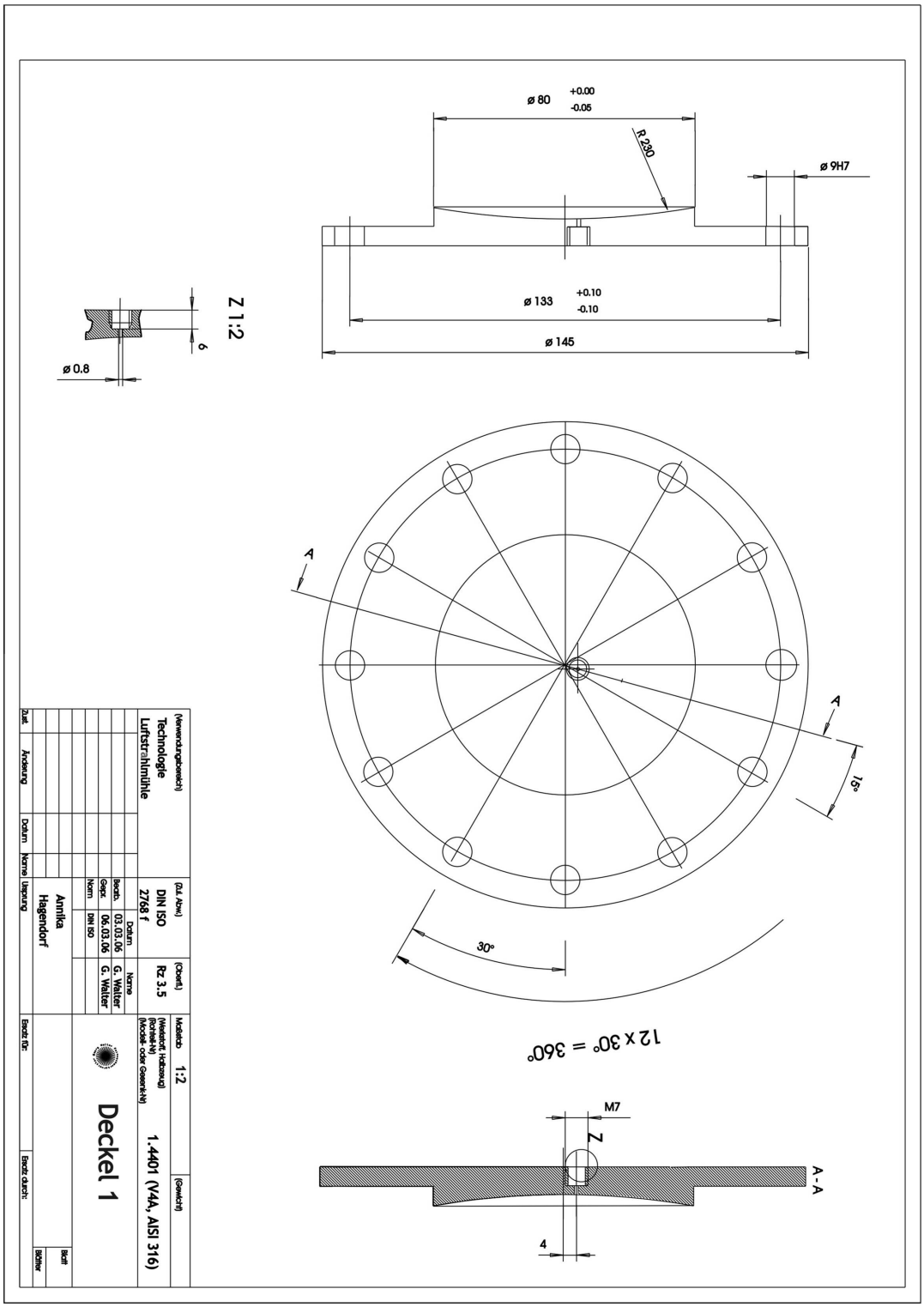
9 Anhang

9.1 Konstruktionszeichnungen der Spiralstrahlmühle JMRS 80

9.1.1 Mahlkammerdeckel mit Messbohrungen auf den Radien 35,5; 26,5; 17,0; 13,0; 11,0; 9,0; 0,0 mm



9.1.2 Mahlkammerdeckel mit Messbohrung auf dem Radius 4,0 mm



9.2 Programm zur Ansteuerung des Druckaufnehmers für den statischen Druck und des Freiblasventils

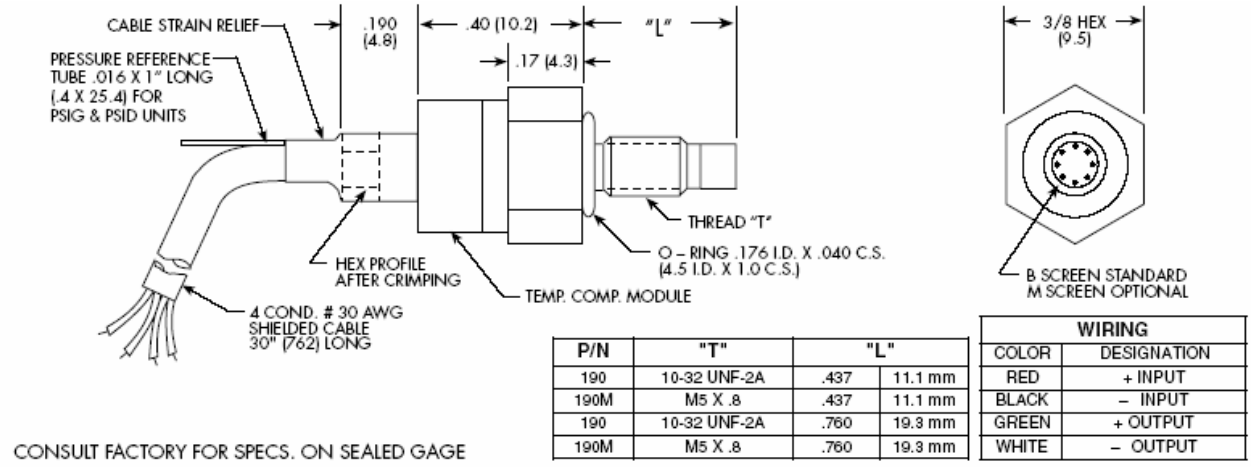
MS Excel 97; Kai Kretzler, Universität Würzburg, 2000

```
FRYMA
Option Explicit

Dim Blatt$
Dim Gerät, ix As Integer
Dim Dauer, Intervall, Inter2, Dau2 As Double
Sub MÜHLE()
   Blatt$ = "Mühle"
   Range("D1").Select: ix = ActiveCell.Value
   Dauer = ThisWorkbook.Sheets(Blatt$).Cells(1 + ix, 15).Value * 60 * 1000
   Range("D2").Select: ix = ActiveCell.Value
   Intervall = ThisWorkbook.Sheets(Blatt$).Cells(1 + ix, 16).Value * 1000
   Range("D7").Select: ix = ActiveCell.Value
   Inter2 = ThisWorkbook.Sheets(Blatt$).Cells(1 + ix, 17).Value
   Range("D8").Select: ix = ActiveCell.Value
   Dau2 = ThisWorkbook.Sheets(Blatt$).Cells(1 + ix, 19).Value
   Call Druck(Dauer, Intervall, Inter2, Dau2)
End Sub

MÜHLE
Declare Sub IX_OPENCOM Lib "RSAPI.DLL" (ByVal ix%, ByVal A$)
Declare Sub IX_CLOSECOM Lib "RSAPI.DLL" (ByVal ix%)
Declare Sub IX_TIMEOUT Lib "RSAPI.DLL" (ByVal ix%, ByVal ms%)
Declare Sub IX_STRREAD Lib "RSAPI.DLL" (ByVal ix%, ByVal A$)
Declare Sub IX_STRLENGTH Lib "RSAPI.DLL" (ByVal ix%, ByVal L%)
Declare Sub TIMEINIT Lib "RSAPI.DLL" ()
Declare Function TIMEREAD Lib "RSAPI.DLL" () As Long
Declare Sub IX_SENDSTRING Lib "RSAPI.DLL" (ByVal ix%, ByVal B$)
Declare Sub DELAY Lib "RSAPI.DLL" (ByVal ms%)
Declare Function KBHIT Lib "RSAPI.DLL" () As Boolean
Declare Sub IX_DTR Lib "RSAPI.DLL" (ByVal ix%, ByVal anaus%)
Declare Sub IX_RTS Lib "RSAPI.DLL" (ByVal ix%, ByVal anaus%)
Option Explicit
Dim Zeile, Rate, Tara, cyc, Schreiber, Schnittstelle, neu, t, t1, Zeit, Display$, dummy$, Blatt$
Sub Druck(Dauer, Intervall, Inter2, Dau2)
   Blatt$ = "Mühle"
   ThisWorkbook.Sheets(Blatt$).Activate
   Columns("A:B").Select
   Selection.ClearContents
   Range("A1").Select
   ActiveCell.Select
   ActiveCell.FormulaR1C1 = "Zeit [min]"
   ActiveCell.Offset(0, 1).Range("A1").Select
   ActiveCell.FormulaR1C1 = "Druck [mbar]"

   IX_OPENCOM 4, "COM4,9600,N,8,1"
   IX_OPENCOM 1, "COM1,9600,N,8,1"

   IX_TIMEOUT 1, 50
   IX_STRLENGTH 1, 8
   Display$ = "aaaabbbbb"
   dummy$ = "aaaabbbbb"
   IX_STRREAD 1, (dummy$)
```

```
   Zeile = 2
   t = 0
   t1 = 0
   TIMEINIT

   While t1 < Dauer
      Do
         t1 = TIMEREAD
      Loop Until t1 >= t
      IX_STRREAD 1, (Display$)

      Application.Calculation = xlManual
      ThisWorkbook.Sheets(Blatt$).Cells(Zeile, 2).Value = Left$(Display$, 7)
      ThisWorkbook.Sheets(Blatt$).Cells(Zeile, 1).Value = t1 / 60 / 1000
      Range("D6").Select: Schreiber = ActiveCell.Value
      If Schreiber = True Then
         Application.Calculation = xlAutomatic
      End If
      Zeile = Zeile + 1
      t = t + Intervall
      If KBHIT = True Then
        Dauer = 0
      End If
      If Zeile / Inter2 = Int(Zeile / Inter2) Then
         IX_RTS 4, 1
         DELAY 100
         IX_RTS 4, 0
         DELAY 500
         t = t + 600
         Do
            t1 = TIMEREAD
         Loop Until t1 >= t
         IX_STRREAD 1, (dummy$)
         Do
            t1 = TIMEREAD
         Loop Until t1 >= t
         IX_STRREAD 1, (dummy$)
         Do
            t1 = TIMEREAD
         Loop Until t1 >= t
         IX_STRREAD 1, (dummy$)
      End If

   Wend
   Application.Calculation = xlAutomatic
   IX_SENDSTRING 1, "M" + Chr(13) + Chr(10)

   IX_CLOSECOM 1
   IX_CLOSECOM 4

   neu = MsgBox("Neue Arbeitsmappe mit Daten und Diagramm anlegen?", 36, "Speichern der Daten")
   If neu = vbYes Then
      Call NeueMappe(Zeile, Blatt$)
   End If
End Sub

Sub NeueMappe(Zeile, Blatt$)

   Sheets(Blatt$).Select
      Columns("A:B").Select
      Selection.Copy
      Workbooks.Add
```

```
    Sheets("Tabelle1").Select
    Sheets("Tabelle1").Name = "Daten"
    ActiveCell.Columns("A:B").EntireColumn.Select
    ActiveSheet.Paste
    Charts.Add
    ActiveChart.ChartWizard Source:=Sheets("Daten").Range(Sheets("Daten").Cells(257), _
       Sheets("Daten").Cells(Zeile * 256 + 2)), Gallery:=xlXYScatter, Format:=2, PlotBy:=xlColumns, _
       CategoryLabels:=1, SeriesLabels:=1, HasLegend:=1, Title:="Kammerdruck", _
       CategoryTitle:="Zeit [min]", ValueTitle:="Druck [mbar]", _
       ExtraTitle:=""
    Application.Calculation = xlAutomatic
End Sub
```

9.3 Konstruktionszeichnung des Druckaufnehmers für den statischen Druck XT 190 M



CONSULT FACTORY FOR SPECS. ON SEALED GAGE

P/N	"T"	"L"	
190	10-32 UNF-2A	.437	11.1 mm
190M	M5 X .8	.437	11.1 mm
190	10-32 UNF-2A	.760	19.3 mm
190M	M5 X .8	.760	19.3 mm

WIRING	
COLOR	DESIGNATION
RED	+ INPUT
BLACK	– INPUT
GREEN	+ OUTPUT
WHITE	– OUTPUT

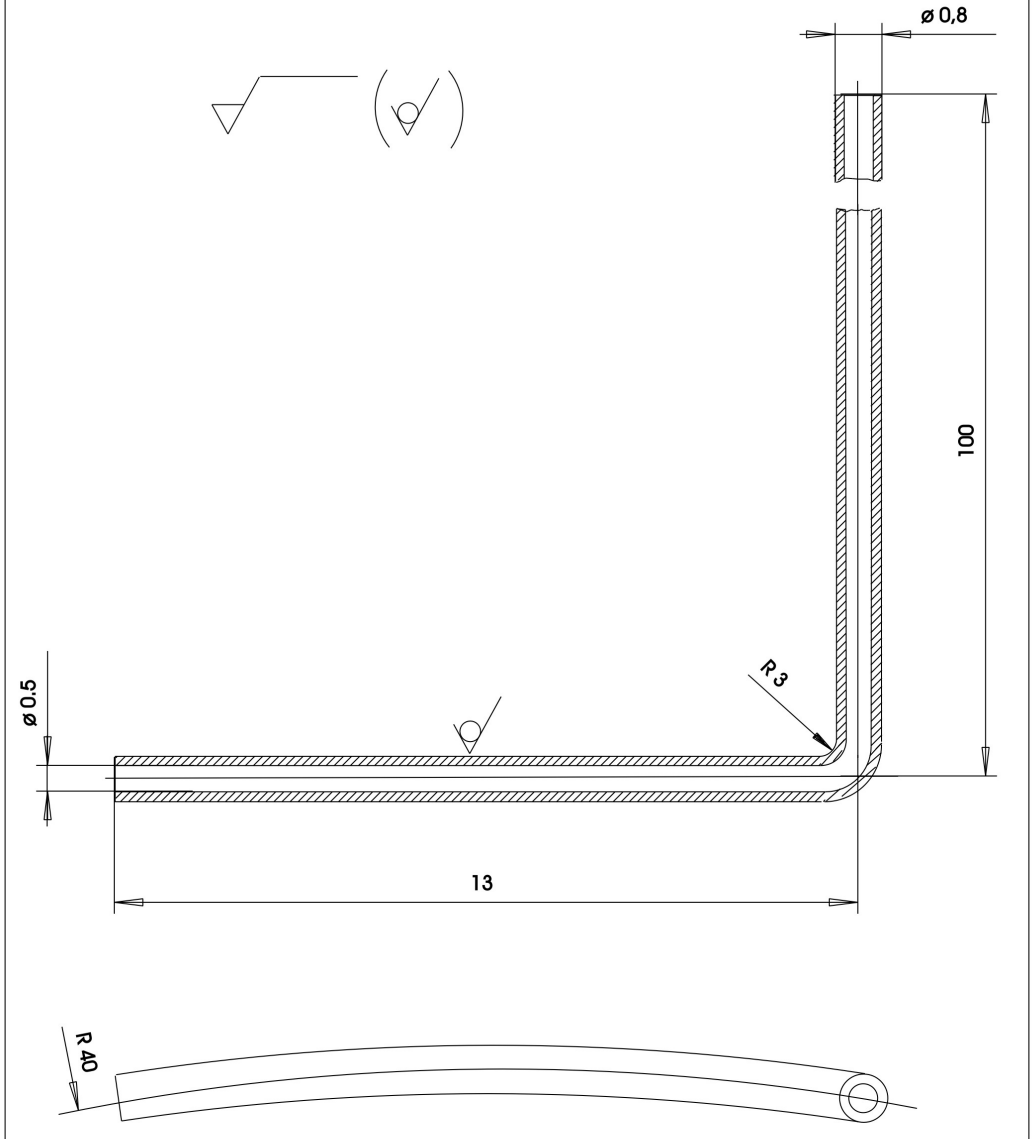
9.4 Einstellung der Förderraten

Die folgende Tabelle gibt die Einstellungen des Schrittmotors wieder, mit denen die mittleren Förderraten der Mahlsubstanz pro Minute im Halbschrittmodus erzielt werden (n = 10):

Förderrate [g/min]	Kondensator [µF]	Stufe [-]
1,78 ± 0,27	10	0
3,49 ± 0,28	8	1
6,65 ± 0,33	3	1

9.5 Konstruktionszeichnungen des Pitot-Rohres, Distanzrohres und Mahlkammerdeckels

9.5.1 Pitot-Rohr - Ansicht I und II



(Verwendungsbereich) Technologie Luftstrahlmühle	(Zul. Abw.) DIN ISO 2768 f	(Oberfl.) Rz 3.5 Roh	Maßstab 10:1 / (Gewicht)
			(Werkstoff, Halbzeug) (Rohteil-Nr) (Modell- oder Gesenk-Nr) 1.4305

	Datum	Name
Bearb.	06.02.06	G. Walter
Gepr.	08.02.06	G. Walter
Norm	DIN ISO	

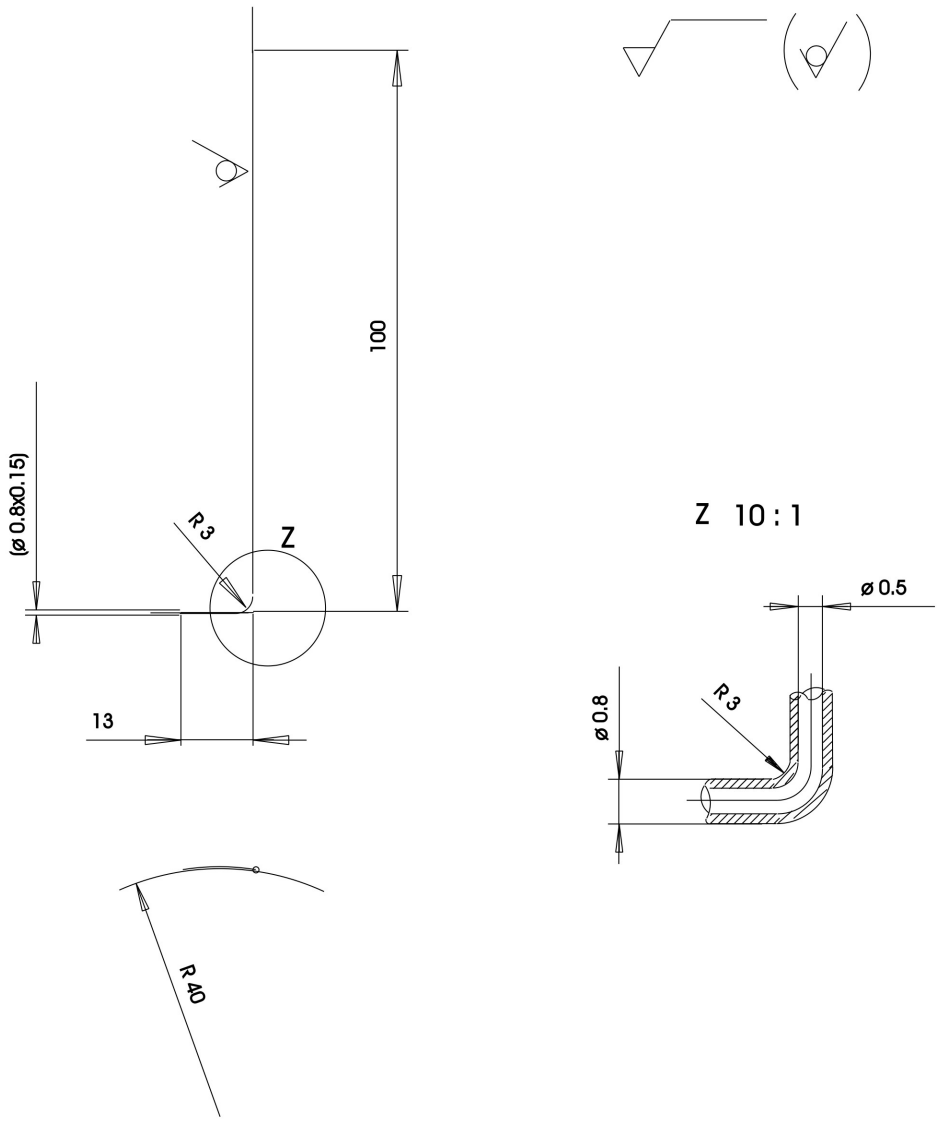
Pitot-Rohr 1

Annika Hagendorf

2006H001Zi

Blatt / Blätter

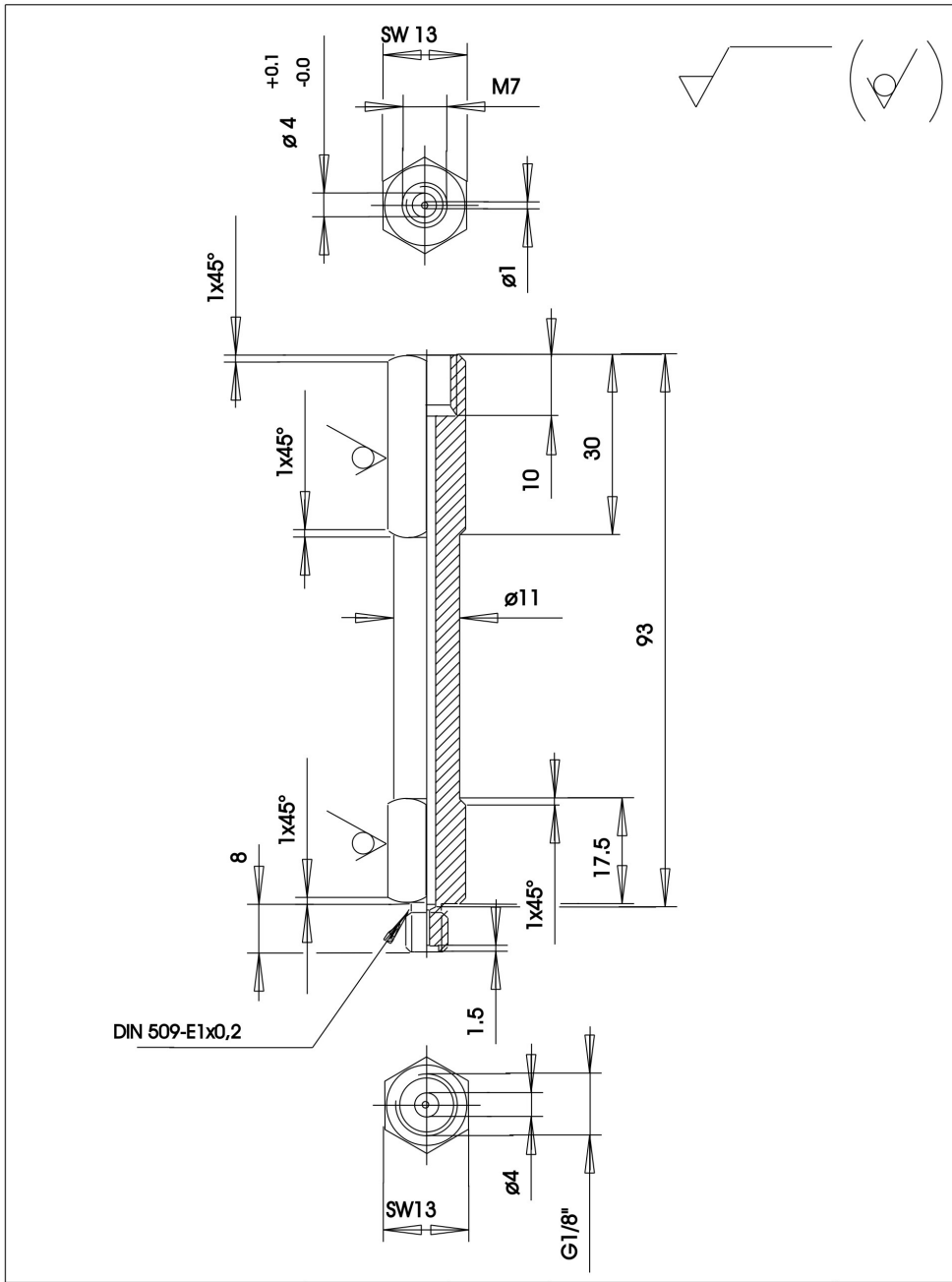
Zust.	Änderung	Datum	Name	Ursprung	Ersatz für:	Ersatz durch:



(Verwendungsbereich) Technologie Luftstrahlmühle				(Zul. Abw.) DIN ISO 2768 f		(Oberfl.) Rz 3.5 Roh	Maßstab 1:1 (10:1)		(Gewicht)	
							(Werkstoff, Halbzeug) (Rohteil-Nr) (Modell- oder Gesenk-Nr)		1.4305	
					Datum	Name				
				Bearb.	06.02.06	G. Walter				
				Gepr.	08.02.06	G. Walter				
				Norm	DIN ISO					
				Annika Hagendorf			2006H001Zi			Blatt
										Blätter
Zust.	Änderung	Datum	Name	Ursprung			Ersatz für:		Ersatz durch:	

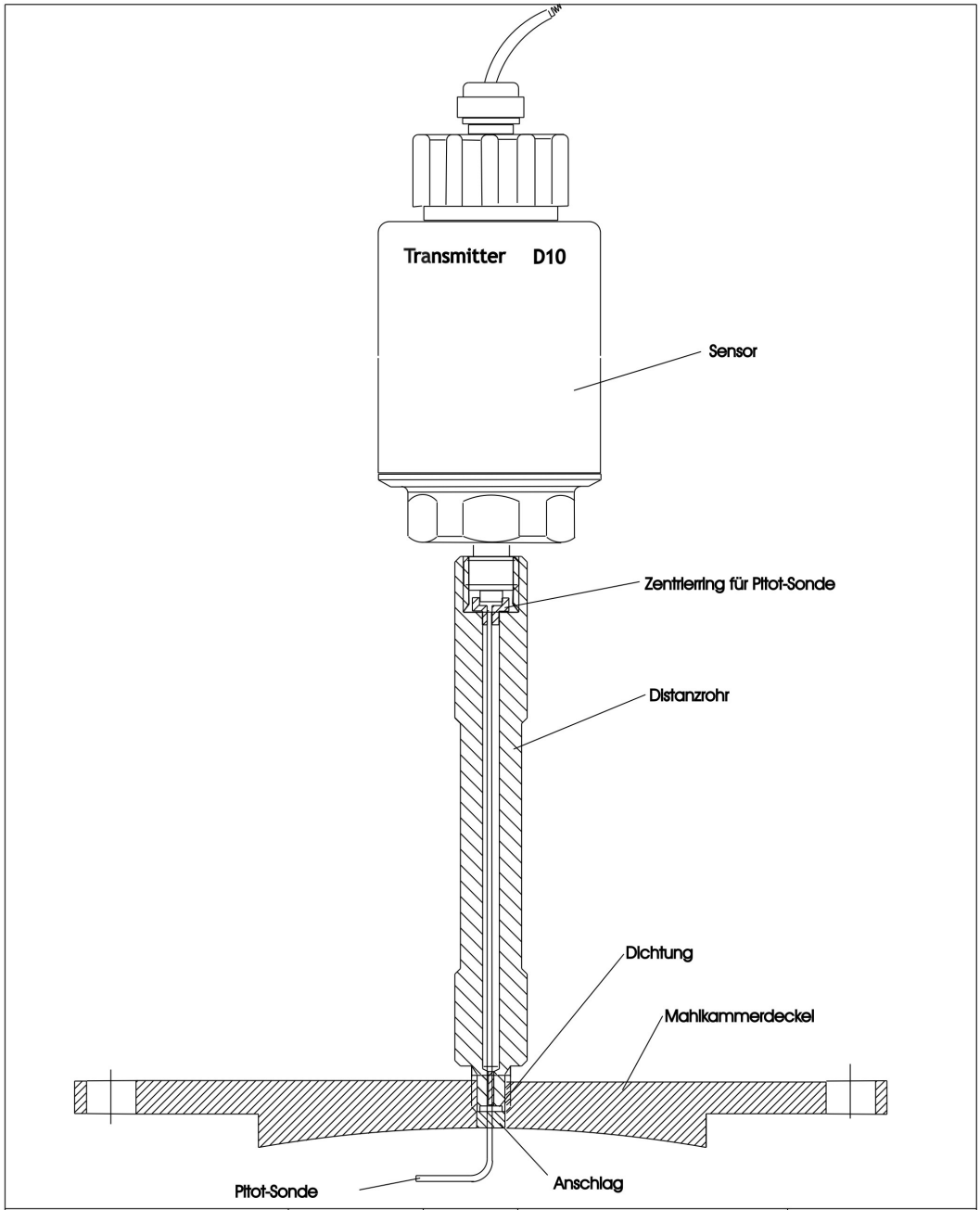
Pitot-Rohr 2

9.5.2 Distanzrohr



(Verwendungsbereich) Technologie Luftstrahlmühle				(Zul. Abw.) DIN ISO 2768 f		(Oberfl.) Rz 3.5 Roh	Maßstab 1:1		(Gewicht)
							(Werkstoff, Halbzeug) (Rohteil-Nr) (Modell- oder Gesenk-Nr)		1.4305
					Datum	Name			
				Bearb.	04.01.06	G. Walter	Distanzrohr für Sensor		
				Gepr.	27.02.06	G. Walter			
				Norm	DIN ISO				
				Annika Hagendorf			2006H001Zi		Blatt / Blätter
Zust.	Änderung	Datum	Name	Ursprung			Ersatz für:	Ersatz durch:	

9.5.3 Eingebautes Pitot-Rohr in den Mahlkammerdeckel



(Verwendungsbereich) Technologie Luftstrahlmühle	(Zul. Abw.) DIN ISO 2768 f	(Oberfl.) Rz 3.5 Roh	Maßstab 1:1 / (Gewicht)
			(Werkstoff, Halbzeug) (Rohteil-Nr) (Modell- oder Gesenk-Nr) 1.4305

	Datum	Name
Bearb.	31.01.06	G. Walter
Gepr.	01.02.06	G. Walter
Norm	DIN ISO	

Deckel mit Sonde Zusammenbau-Zeichnung

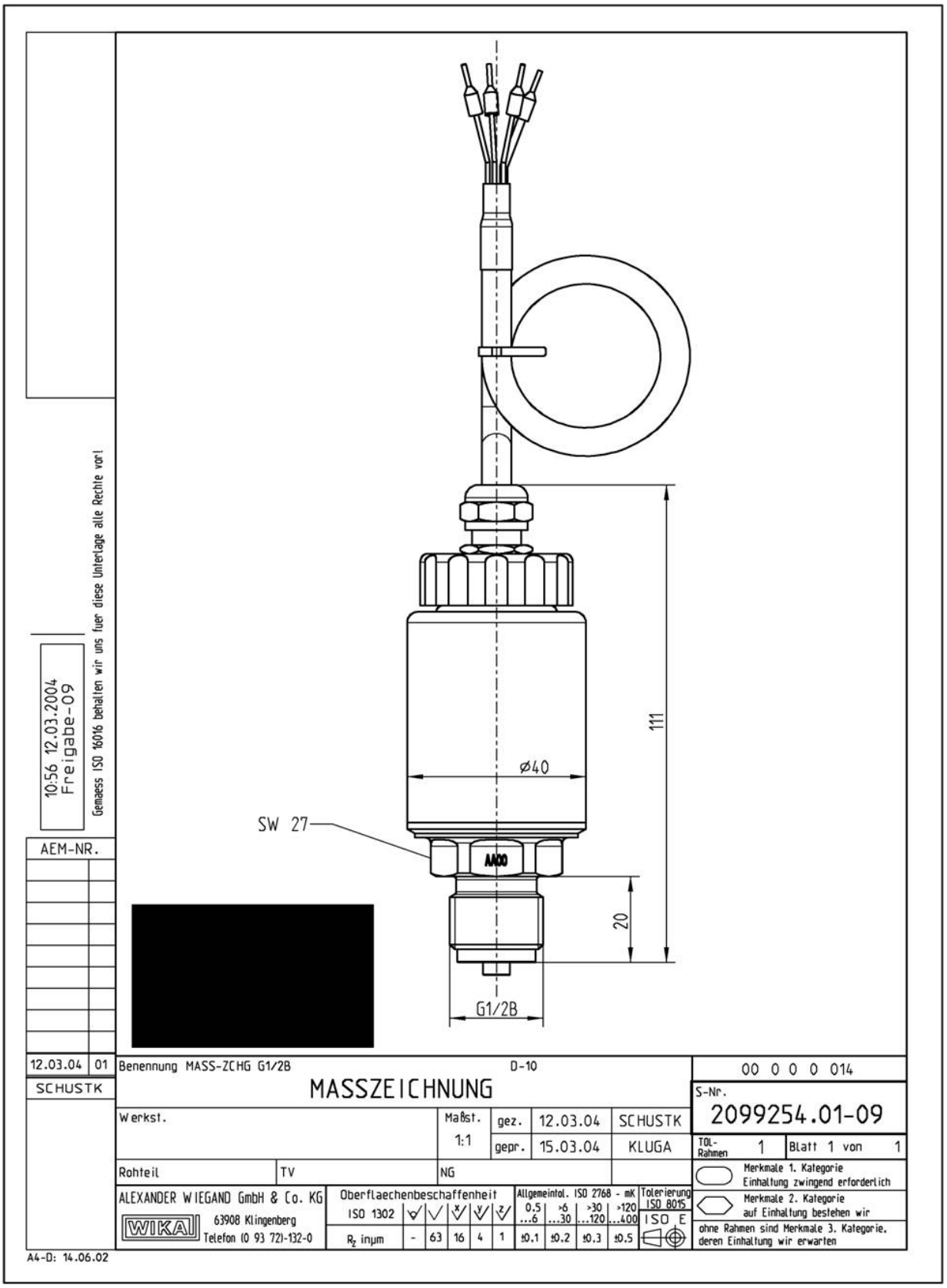
Annika Hagendorf

2006H001Zi

Blatt / Blätter

Zust.	Änderung	Datum	Name	Ursprung	Ersatz für:	Ersatz durch:

9.6 Konstruktionszeichnung des Gesamtdruckaufnehmers D 10



9.7 Programm zur graphischen Darstellung der Strömungsprofile

MATLAB®; Markus Meier, ZAE Universität Würzburg, 2006

```
% muehle(dateiname)

%   zeichnet Farb-Pfeil-Plot
%   dateiname: Name des einzulesenden Datenfiles
function muehle(dateiname);

% Einlesen der Daten aus der Datei
   daten=load(dateiname);

% Ein paar Einstellungen
   gesradius=40.0; % Radius des aeusseren Kreises
   inradius=12.5;  % Radius des inneren Kreises
   farbzahl=64;    % Anzahl der zu verwendenden Farben

% verwendete Colormap (mit richtiger Farbanzahl)
   mappe=jet(farbzahl);

% Umkonfigurieren der Daten (Drehung und Bogenmass)
   winkel=(180-daten(:,1))/180*pi;;
   radius=daten(:,2);
   richtung=(180-daten(:,9)+90)/180*pi;
   geschwindigkeit=daten(:,12);

% Umrechnen in karthesische Koordinaten
   [x_ort,y_ort]=pol2cart(winkel,radius);
   [x_richtung,y_richtung]=pol2cart(richtung,geschwindigkeit);
   [deltax,deltay]=pol2cart(richtung,13);

% Oeffne Figure-Fenster
   figure(1);
   hold off;

% Kreise malen
   t = (0:0.01:1).'*2*pi; % Laufparameter
   circ_x = sin(t);
   circ_y = cos(t);
   % aeusserer Kreis
   fill(gesradius*circ_y,gesradius*circ_x,'w');
   hold on; % ab jetzt wird in gleichen Plot gemalt
   % innerer Kreis
   plot(inradius*circ_y,inradius*circ_x,'k');

% Fuenfeck-Duesen
   t=(0:1/5:1).'*2*pi;

   laenge=49; % Laenge der Striche (ausprobieren!)
   abstand=10; % Drehungswinkel der ersten Duesenoeffnung
   drehung=54; % Drehwinkel der Duesen zur Tangente an Kreis
   start_x=sin(t);
   start_y=cos(t);
   % alle fuenf Linien malen
   for ii=1:5
      h(ii)=line([0 laenge],[gesradius gesradius],'Color',[0.5 0.5 0.5],'LineStyle','--');
      rotate(h(ii),[0 0 1],-drehung,[0 gesradius 0]);
      rotate(h(ii),[0 0 1],-abstand,[0 0 0]);
      rotate(h(ii),[0 0 1],(-(ii-1)*72),[0 0 0]);
```

```
   end

% Und die Pfeilchen
   % jeder Pfeil wird einzeln gezeichnet, die Farbe von Hand berechnet
   for ii=1:length(x_ort)
      for jj=1:farbzahl
         %if geschwindigkeit(ii) >= min(geschwindigkeit)+jj*(max(geschwindigkeit)-
min(geschwindigkeit))/farbzahl
         if geschwindigkeit(ii) >= 20+jj*(250-20)/farbzahl
            index=jj;
         end
      end
      quiver(x_ort(ii)+x_richtung(ii)/100*3.33*1.5+deltax(ii),y_ort(ii)+y_richtung(ii)/100*3.33*1.5+deltay(ii),-
x_richtung(ii)/100*3.33*1.5,-
y_richtung(ii)/100*3.33*1.5,0,'Color',mappe(index,:),'LineWidth',4,'MaxHeadSize',5);
   end

% quadratischen Plot ohne Achsen
   axis equal;
   axis tight;
   axis off;

% Farbwerte auf Minimum und Maximum skalieren
   %caxis([min(geschwindigkeit),max(geschwindigkeit)]);
   caxis([20 250]);
   h=colorbar('YDir','reverse','location','SouthOutside');
   set(get(h,'XLabel'),'String','Geschwindigkeit [m/s]','FontSize',14);

% Bild als emf-Datei ausgeben
   for ii=1:length(dateiname)-3
      dateiname_aus(ii)=dateiname(ii);
   end
   dateiname_aus=[dateiname_aus 'emf'];
   print(dateiname_aus,'-dmeta');
```

9.8 Rohdaten der Messungen des Gesamtdrucks

9.8.1 Radius 0,0 mm

Eintauchtiefe 4 mm

Temperatur [°C] 23
relative Feuchte [%] 38
äußerer Luftdruck [hPa] 1022

Position [-] / Winkel [°]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	-12	-14	-16	-33	-63	-107	-126	-99	-83	-82	-66	-34
-10	-11	-14	-24	-42	-81	-116	-121	-90	-90	-78	-59	-25
-15												2
-20	-11	-15	-25	-56	-95	127	-116	-89	-84	-72	-46	**-12**
-25												-1
-30	-14	-20	-37	-73	-111	-131	-101	-89	-85	-68	-46	-19
-40	-15	-20	-45	-80	-120	-131	-97	-84	-84	-64	-43	-27
-50	-26	-35	-68	-107	-131	-108	-84	-77	-71	-59	-32	-25
-60	-25	-41	-69	-112	-130	-88	-84	-78	-70	-55	-29	-23
-70	-27	-49	-84	-121	-130	-82	-77	-77	-64	-52	-28	-21
-80	-36	-65	-102	-132	-105	-78	-78	-77	-63	-43	-26	-29
-90	-48	-83	-124	-126	-76	-89	-78	-66	-49	-27	-22	-31
-100	-60	-100	-132	-111	-72	-78	-74	-62	-36	-25	-25	-38
-110	-82	-112	-116	-79	-85	-82	-64	-37	-21	-23	-31	-45
-115									-1			
-120	-46	-87	-119	-92	-93	-86	-65	-16	**2**	-3	-10	-13
-125									-2			
-130	-55	-96	-122	-101	-85	-79	-63	-15	-5	-7	-18	-28
-140	-84	-116	-104	-96	-81	-74	-54	-13	-8	-16	-21	-45
-150	-100	-129	-100	-84	-91	-70	-35	-19	-16	-19	-36	-61
-160	-112	-126	-92	-86	-83	-67	-29	-16	-17	-22	-46	-72
-170	-124	-115	-80	-87	-77	-56	-27	-16	-22	-28	-49	-87
-180	-123	-103	-83	-84	-67	-37	-11	-20	-25	-35	-68	-105
-185							**5**	0		6	6	
-190	-117	-90	-86	-73	-60	-24	-3	-4	-9	-17	-35	-92
-195						-14	0	**3**		**16**	**35**	
-200	-104	-89	-81	-70	-47	-5	-7	-10	-1	-36	-82	-118
-205						**-1**						
-210	-105	-97	-79	-58	-25	-11	-5	-11	-14	-40	-93	-117
-220	-93	-82	-67	-34	-12	-13	-15	-14	-42	-86	-116	-98
-230	-89	-82	-67	-26	-7	-13	-15	-24	-56	-91	-116	-109
-240	-94	-78	-63	-30	-14	-27	-20	-28	-61	-105	-117	-103
-250	-88	-78	-67	-22	-8	-12	-7	-11	-48	-85	-113	-98
-260	-86	-76	-58	-12	-6	-14	-14	-32	-56	-99	-113	-92
-270	-79	-64	-25	-1	-7	-14	-17	-62	-82	-118	-85	-83
-280	-72	-54	-14	-5	-12	-18	-26	-73	-108	-113	-100	-85
-290	-70	-40	-8	-7	-8	-18	-46	-83	-112	-111	-79	-83
-300	-69	-32	-9	-5	-14	-26	-38	-89	-120	-111	-83	-82
-310	-64	-28	-2	-15	-13	-31	-59	-94	-117	-105	-88	-78
-320	-48	-9	-3	-12	-10	-30	-70	-115	-144	-99	-81	-73
-330	-40	-6	-1	-2	-12	-35	-80	-118	-117	-97	-83	-76
-335		1			13							
-340	-18	**17**	27	3	**39**	-13	-66	-110	-102	-97	-84	-60
-345	7	3	5	7	28							
-350	**2**	13	**41**	**36**	27	-38	-88	-106	-100	-88	-80	-42
-355	-3		3	-17								

Die aufgelisteten Gesamtdruckwerte sind in hPa angegeben.

9.8.2 Radius 4,0 mm

Eintauchtiefe 4 mm

Temperatur [°C] 22
relative Feuchte [%] 30
äußerer Luftdruck [hPa] 1021

Position [-] / Winkel [°]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	103	125	123	103	63	10	1	-4	7	38	56	73
-5			126	**112**	**75**		-5	-4	13			
-10	78	103	116	101	74	26	**9**	**-2**	3	18	38	66
-15					72	28	-4	-7				
-20	61	80	91	88	69	**31**	7	-6	-5	1	17	43
-25						16						
-40	26	34	38	36	18	-15	-46	-48	-33	-18	-5	10
-50	13	23	24	22	6	-16	-46	-50	-36	-23	-12	-0,6
-60	-10	-2	-0,8	-5	-18	-34	-47	-54	-43	-33	-25	-18
-70	-15	-7	-4	-10	-21	-34	-49	-55	-45	-34	-27	-22
-80	-22	-16	-14	-18	-29	-40	-51	-57	-48	-39	-32	-27
-90	-25	-23	-20	-23	-33	-45	-55	-59	-53	-43	-36	-32
-100	-31	-30	-27	-26	-38	-50	-61	-61	-48	-45	-35	-33
-110	-30	-31	-30	-34	-39	-55	-63	-60	-45	-34	-31	-33
-120	-32	-35	-38	-38	-47	-58	-65	-60	-42	-29	-28	-28
-130	-33	-34	-35	-40	-46	-59	-64	-60	-42	-30	-28	-29
-140	-28	-34	-39	-40	-51	-61	-67	-65	-51	-33	-25	-25
-150	-24	-28	-36	-43	-51	-63	-71	-72	-61	-38	-25	-22
-160	-25	-29	-35	-46	-49	-60	-73	-76	-72	-49	-29	-23
-170	-23	-25	-30	-38	-55	-67	-88	-93	-94	-91	-63	-32
-180	-67	-37	-27	-33	-49	-81	-92	-79	-79	-88	-103	-116
-190	-120	-85	-59	-50	-65	-103	-92	-67	-70	-72	-83	-110
-200	-120	-112	-82	-61	-77	-101	-82	-62	-53	-54	-76	-99
-210	-98	-113	-112	-112	-105	-107	-79	-62	-43	-49	-47	-67
-220	-87	-67	-47	-47	-113	-110	-94	-52	-34	-31	-41	-56
-230	-50	-84	-104	-118	-120	-116	-88	-56	-18	-13	-10	-26
-240	-22	-58	-88	-106	-117	-109	-81	-51	-13	3	7	-5
-250	-4	-35	-68	-91	-115	-108	-91	-39	-9	15	19	10
-260	3	-25	-59	-87	-107	-110	-88	-45	-9	20	27	22
-270	31	-2	-40	-64	-90	-99	-83	-35	-4	32	39	35
-280	50	27	-8	-39	-71	-85	-77	-41	-4	42	57	58
-285										**45**		
-290	73	56	14	-14	-57	-79	-72	-52	9	43	68	76
-295										**45**		
-300	81	70	34	-11	-49	-68	-73	-51	-14	37	73	87
-310	99	89	57	23	-25	-57	-60	-54	-7	37	82	96
-315											77	
-320	108	103	76	32	-27	-64	-65	-58	-11	37	**87**	102
-325											81	105
-330	116	121	99	67	13	-35	-46	-47	-25	26	67	**114**
-335	123											105
-340	**126**	124	116	73	38	-17	-24	-29	-19	23	66	106
-345	123	127										
-350	119	129	119	91	41	-15	-32	-16	-11	30	49	97
-355		**133**	**128**	105					2			

Eintauchtiefe 5 mm

Temperatur [°C] 24
relative Feuchte [%] 40
äußerer Luftdruck [hPa] 1030

Position [-] / Winkel [°]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-10	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-20	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-30	27	37	40	34	15	-14	-40	-40	-27	-14	-3	11
-40	21	31	34	28	10	-19	-42	-42	-27	-16	-8	5
-50	0	9	11	1	-13	-27	-43	-45	-34	-26	-20	-11
-60	-11	-2	1	-6	-19	-32	-46	-48	-41	-32	-25	-18
-70	-17	-11	-6	-11	-26	-35	-47	-51	-43	-34	-27	-25
-80	-23	-17	-14	-16	-30	-40	-50	-54	-46	-36	-33	-28
-90	-29	-25	-22	-23	-33	-46	-55	-57	-51	-44	-37	-33
-100	-34	-32	-29	-31	-40	-52	-61	-58	-49	-42	-36	-34
-110	-33	-33	-35	-35	-41	-55	-64	-57	-42	-35	-32	-33
-120	-32	-34	-35	-39	-44	-56	-64	-60	-40	-33	-30	-31
-130	-33	-36	-40	-41	-46	-59	-64	-58	-42	-31	-329	-30
-140	-27	-31	-37	-43	-53	-62	-69	-68	-47	-29	-23	-23
-150	-23	-29	34	-43	-52	-62	-71	-70	-54	-35	-25	-21
-160	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-170	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-180	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-190	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-200	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-210	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-220	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-230	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-240	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-250	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-260	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-270	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-280	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-290	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-300	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-310	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-320	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-330	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-340	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-350	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t

Eintauchtiefe 6 mm

Temperatur [°C] 24
relative Feuchte [%] 41
äußerer Luftdruck [hPa] 1033

Position [-] / Winkel [°]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-10	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-20	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-30	28	34	38	35	19	-10	-34	-32	-19	-8	1	18
-40	13	18	17	10	-5	-26	-42	-40	-29	-19	-10	-1
-50	3	12	12	1	-15	-31	-44	-43	-32	-24	-18	-8
-60	-11	-1	0	-7	-23	-37	-47	-47	-39	-31	-26	-19
-70	-16	-8	-4	-11	-25	-38	-46	-49	-41	-33	-28	-23
-80	-26	-18	-14	-16	-29	-42	-49	-52	-47	-40	-35	-31
-90	-31	-26	-23	-24	-32	-44	-55	-57	-53	-45	-39	-33
-100	-33	-32	-32	-28	-37	-52	-62	-62	-53	-47	-40	-39
-110	-36	-38	-37	-35	-41	-56	-65	-57	-46	-37	-36	-36
-120	-37	-37	-44	-43	-48	-61	-67	-58	-43	-34	-30	-34
-130	-33	-37	-40	-43	-44	-60	-67	-52	-41	-30	-30	-33
-140	-30	-34	-38	-46	-49	-62	-69	-59	-37	-30	-23	-25
-150	-23	-28	-33	-39	-49	-61	-70	-71	-62	-50	-37	-21
-160	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-170	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-180	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-190	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-200	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-210	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-220	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-230	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-240	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-250	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-260	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-270	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-280	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-290	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-300	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-310	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-320	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-330	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-340	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-350	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t

Eintauchtiefe 7 mm

Temperatur [°C] 24
relative Feuchte [%] 38
äußerer Luftdruck [hPa] 1034

Position [-] / Winkel [°]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-10	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-20	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-30	21	23	11	0	-10	-18	-36	-30	-17	-9	0	12
-40	11	25	10	0	-22	-34	-42	-36	-25	-19	-13	-3
-50	1	14	12	-3	-23	-37	-44	-40	-30	-23	-19	-11
-60	-11	-3	7	-8	-24	-41	-45	-41	-34	-29	-25	-19
-70	-18	-11	-3	-10	-28	-36	-46	-45	-39	-32	-29	-25
-80	-25	-19	-9	-13	-29	-41	-48	-48	-42	-36	-34	-29
-90	-30	-26	-21	-23	-27	-45	-53	-53	-48	-42	-35	-33
-100	-33	-32	-28	-27	-32	-47	-59	-58	-51	-41	-37	-34
-110	-32	-34	-31	-29	-34	-50	-60	-59	-49	-40	-38	-36
-120	-35	-35	-35	-35	-36	-51	-63	-58	-47	-37	-34	-33
-130	-31	-33	-39	-43	-45	-56	-65	-55	-40	-30	-29	-31
-140	-29	-33	-36	-42	-48	-58	-66	-61	-40	-28	-25	-25
-150	-26	-31	-35	-40	-49	-60	-67	-66	-54	-42	-28	-25
-160	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-170	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-180	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-190	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-200	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-210	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-220	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-230	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-240	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-250	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-260	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-270	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-280	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-290	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-300	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-310	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-320	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-330	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-340	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-350	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t

Eintauchtiefe 8 mm

Temperatur [°C] 24
relative Feuchte [%] 40
äußerer Luftdruck [hPa] 1033

Position [-] / Winkel [°]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-10	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-20	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-30	17	17	19	6	-12	-29	-37	-25	-13	-6	0	11
-40	10	12	10	-11	-22	-29	-38	-31	-20	-14	-8	0
-50	-8	0	10	-6	-27	-33	-41	-37	-29	-25	-22	-15
-60	-13	-5	-4	-4	-25	-34	-41	-38	-33	-30	-25	-20
-70	-19	-12	-4	-2	-27	-38	-42	-39	-37	-30	-29	-25
-80	-28	-23	-19	-11	-23	-43	-47	-46	-43	-39	-35	-32
-90	-32	-28	-23	-23	-24	-42	-52	-52	-49	-43	-37	-35
-100	-33	-33	-31	-27	-29	-42	-57	-57	-53	-45	-38	-41
-110	-33	-34	-37	-35	-36	-43	-63	-60	-52	-41	-39	-34
-120	-32	-33	-37	-39	-36	-47	-64	-62	-49	-36	-33	-33
-130	-31	-31	-36	-37	-44	-51	-62	-63	-50	-33	-31	-30
-140	-26	-29	-35	-39	-47	-57	-71	-73	-54	-39	-28	-24
-150	-24	-29	-34	-34	-43	-49	-65	-69	-59	-41	-34	-27
-160	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-170	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-180	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-190	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-200	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-210	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-220	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-230	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-240	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-250	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-260	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-270	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-280	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-290	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-300	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-310	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-320	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-330	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-340	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-350	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t

9.8.3 Radius 9,0 mm

Eintauchtiefe 3 mm

Temperatur [°C] 17
relative Feuchte [%] 22
äußerer Luftdruck [hPa] 1031

Position [-] / Winkel [°]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	241	255	251	234	211	178	160	144	162	183	199	223
-5		**259**	**253**	237	213	185	159					
-10	220	239	250	**248**	**226**	**199**	**179**	174	171	177	179	195
-20	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p
-30	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p
-40	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p
-50	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p
-60	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p
-70	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p
-80	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p
-90	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p
-100	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p
-110	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p
-120	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p
-130	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p
-140	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p
-150	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p
-160	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p
-170	66	57	43	31	15	17	32	46	52	66	75	75
-180	104	95	86	68	57	52	44	41	52	68	79	103
-190	104	108	103	90	77	63	38	19	13	33	51	77
-200	71	88	98	99	83	58	35	5	9	14	25	42
-210	50	47	48	43	33	19	10	4	8	26	36	54
-220	49	44	45	37	27	15	5	4	13	25	39	50
-230	52	40	42	38	26	17	11	10	18	30	41	55
-240	61	40	37	35	28	23	20	21	31	38	50	60
-250	73	51	44	40	36	35	33	38	45	55	63	69
-260	93	76	58	55	55	54	54	60	70	78	86	89
-270	102	92	67	65	66	65	69	74	80	93	99	101
-280	125	120	94	86	83	87	89	99	107	118	127	128
-290	147	145	117	104	102	103	108	117	130	140	144	149
-300	179	172	150	129	126	125	127	138	154	167	176	180
-310	192	187	168	145	137	138	137	147	160	179	188	196
-320	212	208	195	172	161	155	157	157	172	188	202	213
-325									180			
-330	227	224	214	193	173	173	158	170	**184**	197	214	229
-335								167	178	198	222	
-340	243	237	232	212	195	181	173	**180**	181	**199**	**224**	238
-345	249							161		188	216	**243**
-350	**251**	249	241	221	202	180	166	156	165	187	217	240
-355	**251**	254	245									233

Eintauchtiefe 4 mm

Temperatur [°C] 21
relative Feuchte [%] 28
äußerer Luftdruck [hPa] 1023

Position [-] / Winkel [°]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	246	**254**	**252**	241	223	199	158	152	166	184	204	228
-5	237	246	251	246	229							
-10	231	244	**252**	247	230	203	166	156	159	160	182	206
-15			250	**249**	**237**	208	174					
-20	206	226	240	246	229	**211**	**183**	162	145	146	159	174
-25						188	155					
-30	135	162	186	202	187	152	92	61	42	41	57	95
-40	69	99	117	120	99	65	27	13	11	11	18	33
-50	15	26	35	29	18	7	-1	-4	-5	-5	-1	6
-60	0	6	8	6	0	-5	-11	-14	-15	-13	-10	-5
-70	-14	-12	-11	-13	-16	-21	-25	-28	-30	-28	-24	-18
-80	-25	-25	-24	-27	-29	-31	-32	-35	-36	-33	-31	-28
-90	-32	-30	-30	-31	-33	-34	-30	-36	-36	-33	-35	-32
-100	-35	-35	-38	-37	-36	-33	-32	-30	-32	-31	-32	-34
-110	-30	-32	-32	-33	-31	-29	-26	-25	-23	-23	-24	-27
-120	-22	-23	-24	-25	-23	-21	-19	-17	-16	-16	-17	-18
-130	-18	-19	-17	-17	-15	-14	-12	-11	-9	-10	-16	-19
-140	-2	-15	-18	-14	-10	-8	-7	-2	7	14	13	7
-150	18	4	-9	-11	-7	-5	-3	6	19	29	32	27
-160	45	30	13	1	1	3	11	21	37	49	55	53
-170	81	68	50	37	26	27	34	41	47	63	79	86
-180	98	93	81	64	54	50	47	49	39	54	69	98
-190	93	107	103	91	82	72	41	18	3	21	39	67
-200	60	80	98	97	88	66	26	8	6	20	35	50
-210	50	48	53	49	42	20	10	7	6	18	37	50
-220	48	45	40	33	22	12	4	0	10	22	36	51
-230	52	40	38	32	21	11	7	8	15	26	40	53
-240	60	39	35	31	23	17	19	21	26	37	46	57
-250	72	49	40	35	33	28	30	33	41	50	60	68
-260	84	65	49	45	46	41	44	52	54	66	75	78
-270	98	84	62	60	56	55	58	68	78	83	91	94
-280	127	121	91	81	80	81	86	91	99	112	118	123
-290	160	156	131	111	113	112	113	122	135	146	154	160
-300	169	166	142	126	120	119	123	133	148	158	167	171
-310	196	193	174	151	146	142	143	153	167	176	193	194
-320	211	211	199	174	161	156	152	163	176	192	204	210
-325									176			
-330	220	217	209	187	173	165	161	167	179	195	209	216
-335								**175**	**186**	**207**	**222**	233
-340	233	230	223	206	195	178	169	169	179	196	215	229
-345								174	181	196	220	**237**
-350	243	243	238	225	203	188	168	163	166	187	207	228
-355	**249**	250	246									

Eintauchtiefe 5 mm

Temperatur [°C] 22
relative Feuchte [%] 19
äußerer Luftdruck [hPa] 1024

Position [-] / Winkel [°]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-10	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-20	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-30	125	163	177	188	184	141	87	49	46	43	52	95
-40	65	100	103	106	86	55	26	14	12	13	17	32
-50	12	22	23	20	14	6	-1	-4	-6	-4	-2	3
-60	-2	3	4	4	-1	-6	-12	-16	-17	-15	-11	-7
-70	-13	-10	-9	-10	-14	-19	-24	-28	-29	-27	-22	-17
-80	-24	-21	-20	-21	-25	-29	-31	-35	-36	-34	-30	-27
-90	-34	-35	-32	-32	-34	-35	-36	-35	-37	-37	-34	-33
-100	-33	-35	-33	-38	-34	-33	-33	-32	-31	-31	-32	-32
-110	-29	-31	-32	-34	-31	-28	-26	-25	-23	-23	-23	-26
-120	-20	-23	-25	-25	-23	-22	-19	-17	-16	-16	-16	-17
-130	-16	-17	-19	-19	-18	-16	-14	-13	-12	-13	-16	-16
-140	-14	-18	-18	-14	-11	-10	-9	-7	-4	-2	-3	-8
-150	4	-6	-14	-12	-9	-7	-6	-1	6	11	12	10
-160	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-170	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-180	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-190	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-200	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-210	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-220	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-230	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-240	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-250	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-260	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-270	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-280	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-290	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-300	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-310	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-320	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-330	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-340	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-350	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t

Eintauchtiefe 6 mm

Temperatur [°C] 22
relative Feuchte [%] 20
äußerer Luftdruck [hPa] 1031

Position [-] / Winkel [°]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-10	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-20	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-30	128	156	179	184	180	149	103	60	46	43	56	91
-40	73	97	114	117	99	68	35	22	19	18	20	39
-50	16	31	34	30	20	12	4	0	-2	-1	1	6
-60	-4	1	4	3	-1	-6	-12	-16	-18	-16	-13	-8
-70	-17	-13	-12	-12	-16	-22	-26	-31	-31	-31	-26	-22
-80	-27	-23	-22	-24	-26	-29	-32	-36	-35	-33	-32	-29
-90	-33	-34	-32	-32	35	-34	-33	-33	-35	-32	-32	-32
-100	-34	-35	-36	-35	-34	-33	-31	-31	-31	-30	-31	-32
-110	-31	-34	-36	-34	-32	-31	-28	-26	-23	-23	-24	-28
-120	-21	-24	-26	-27	-24	-23	-20	-18	-17	-17	-16	-18
-130	-16	-17	-18	-18	-16	-14	-13	-11	-10	-9	-13	-17
-140	-10	-18	-20	-14	-10	-9	-9	-8	-6	-3	-1	-2
-150	11	2	-6	-9	-8	-7	-6	-2	4	11	14	13
-160	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-170	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-180	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-190	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-200	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-210	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-220	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-230	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-240	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-250	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-260	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-270	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-280	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-290	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-300	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-310	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-320	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-330	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-340	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-350	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t

Eintauchtiefe 7 mm

Temperatur [°C] 19
relative Feuchte [%] 21
äußerer Luftdruck [hPa] 1026

Position [-] / Winkel [°]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-10	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-20	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-30	128	164	185	196	183	159	107	84	59	51	62	97
-40	49	74	81	78	62	46	25	17	13	11	16	23
-50	6	16	22	21	12	6	0	-3	-6	-6	-5	0
-60	-5	2	4	4	-1	-7	-12	-16	-19	-18	-15	-9
-70	-15	-11	-9	-9	-13	-19	-24	-28	-30	-30	-25	-21
-80	-29	-26	-25	-25	-27	-29	-33	-32	-35	-35	-31	-31
-90	-34	-36	-33	-34	-34	-34	-33	-34	-34	-33	-23	-34
-100	-34	-35	-34	-36	-33	-31	-29	-30	-28	-28	-29	-30
-110	-31	-36	-37	-36	-33	-30	-29	-27	-25	-23	-24	-27
-120	-19	-23	-25	-27	-25	-23	-20	-18	-16	-15	-15	-16
-130	-14	-18	-19	-20	-17	-16	-13	-12	-10	-9	-15	-16
-140	-10	-19	-20	-14	-10	-9	-9	-9	-8	-4	-1	-2
-150	10	3	-6	-9	-9	-8	-7	1	7	10	10	10
-160	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-170	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-180	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-190	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-200	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-210	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-220	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-230	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-240	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-250	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-260	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-270	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-280	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-290	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-300	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-310	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-320	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-330	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-340	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-350	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t

Eintauchtiefe 8 mm

Temperatur [°C] 22
relative Feuchte [%] 17
äußerer Luftdruck [hPa] 1022

Position [-] / Winkel [°]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-10	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-20	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-30	114	141	153	166	162	140	100	80	52	54	57	73
-40	46	80	82	80	67	50	35	20	19	15	17	28
-50	11	26	35	33	19	15	4	0	-1	-2	-3	3
-60	-5	0	4	3	0	-5	-10	-14	-18	-19	-16	-10
-70	-15	-10	-7	-6	-10	-14	-20	-25	-29	-27	-25	-20
-80	-27	-24	-21	-21	-23	-26	-30	-33	-33	-32	-31	-24
-90	-33	-33	-32	-31	-32	-34	-33	-34	-33	-31	-29	-24
-100	-31	-34	-36	-35	-33	-32	-31	-31	-28	-27	-27	-26
-110	-25	-29	-32	-32	-30	-29	-26	-24	-21	-19	-19	-22
-120	-16	-20	-22	-23	-21	-20	-18	-16	-13	-12	-16	-12
-130	-13	-17	-19	-20	-17	-16	-14	-12	-10	-8	-13	-13
-140	-9	-16	-19	-15	-11	-10	-9	-7	-9	-6	0	-2
-150	7	1	-8	-9	-9	-8	-7	-4	2	5	5	9
-160	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-170	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-180	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-190	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-200	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-210	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-220	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-230	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-240	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-250	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-260	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-270	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-280	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-290	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-300	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-310	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-320	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-330	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-340	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-350	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t

9.8.4 Radius 11,0 mm

Eintauchtiefe 3 mm

Temperatur [°C] 21
relative Feuchte [%] 20
äußerer Luftdruck [hPa] 1041

Position [-] / Winkel [°]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	246	252	250	236	212	190	167	160	165	180	203	228
-5		254	**255**	245	222			156				
-10	225	240	249	245	**229**	201	184	**183**	172	177	188	202
-15				**246**	228	204	189	173				
-20	211	232	239	243	**229**	**211**	**196**	162	149	160	165	184
-25					224	198	160					
-40	95	120	133	135	114	69	33	11	12	13	28	56
-50	19	29	31	25	19	6	0	-2	-4	-1	2	10
-60	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p
-70	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p
-80	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p
-90	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p
-100	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p
-110	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p
-120	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p
-130	-16	-17	-17	-17	-17	-16	-14	-12	-11	-12	-13	-14
-140	-14	-16	-13	-12	-10	-9	-7	-4	0	6	1	-5
-150	12	-2	-12	-11	-5	-4	0	6	24	31	31	24
-160	51	39	22	13	10	11	21	30	49	60	65	57
-170	80	66	53	43	31	34	41	49	60	75	83	85
-180	103	99	91	79	65	58	54	43	42	60	80	102
-190	91	110	105	99	87	72	42	30	16	26	30	61
-200	68	84	94	92	83	58	36	15	11	21	32	47
-210	49	50	59	54	36	22	11	8	11	23	37	50
-220	46	41	44	41	27	16	6	4	11	21	36	47
-230	51	41	42	38	27	17	9	6	13	26	37	48
-240	60	40	36	33	29	25	23	23	26	41	49	58
-250	75	54	43	42	39	38	38	40	44	56	64	69
-260	85	70	53	52	49	49	51	53	58	69	72	79
-270	104	95	71	68	68	72	65	77	83	92	101	103
-280	126	121	96	83	85	86	92	98	107	114	122	124
-290	145	141	115	104	97	101	106	112	118	137	144	146
-300	168	163	144	123	118	121	125	132	147	157	165	170
-310	190	183	168	146	140	139	141	150	159	174	186	192
-320	210	209	192	170	157	151	157	160	174	188	202	208
-325										193		
-330	231	227	216	195	178	170	169	167	176	**196**	216	227
-335									176	195	219	
-340	244	238	232	206	198	182	173	176	**178**	**196**	**220**	236
-345	244								170	195	219	236
-350	**251**	249	241	225	210	191	173	160	157	189	217	**239**
-355	248	**255**	252									233

Eintauchtiefe 4 mm

Temperatur [°C] 20
relative Feuchte [%] 20
äußerer Luftdruck [hPa] 1023

Position [-] / Winkel [°]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	245	254	252	241	222	204	179	156	169	182	205	228
-5		252	**255**	249		211	175					
-10	228	239	248	250	237	**213**	176	171	158	152	173	204
-15				**254**	**240**	207						
-20	207	228	242	245	238	209	168	173	163	154	148	185
-25					230							
-30	143	174	194	210	203	163	126	74	49	52	73	113
-40	84	115	129	132	108	71	34	18	13	14	25	48
-50	28	46	54	48	30	15	6	1	0	1	4	11
-60	0	5	7	4	0	-5	-10	-14	-14	-12	-9	-4
-70	-10	-7	-6	-6	-11	-16	-23	-26	-25	-22	-19	-14
-80	-25	-23	-22	-22	-27	-29	-33	-34	-33	-32	-31	-28
-90	-32	-32	-29	-29	-33	-34	-36	-36	-34	-33	-33	-33
-100	-32	-35	-34	-33	-34	-33	-32	-31	-29	-29	-31	-33
-110	-27	-30	-33	-32	-28	-27	-25	-23	-22	-21	-23	-25
-120	-20	-22	-23	-23	-22	-20	-18	-16	-13	-14	-14	-16
-130	-13	-15	-15	-15	-14	-13	-11	-10	-8	-9	-12	-13
-140	-15	-13	-13	-11	-10	-9	-9	-7	-2	-1	-5	-12
-150	22	9	-4	-5	-4	-1	0	9	24	32	37	31
-160	49	34	19	3	2	11	16	23	37	52	57	55
-170	82	71	53	39	37	37	43	52	63	73	84	87
-180	101	95	82	70	62	60	55	51	55	67	81	102
-190	96	108	105	96	86	75	61	33	23	31	43	68
-200	72	85	98	97	90	69	40	19	8	24	38	52
-210	48	48	49	46	36	21	12	8	12	25	42	53
-220	47	41	41	33	21	10	8	8	11	24	39	52
-230	53	38	40	31	21	15	11	11	19	28	41	54
-240	65	41	36	32	27	23	22	26	34	40	52	62
-250	76	54	41	40	36	35	34	43	47	55	64	70
-260	87	69	52	48	47	47	49	54	59	69	77	81
-270	102	92	66	63	63	64	68	72	81	88	95	99
-280	126	117	89	83	81	83	88	97	104	112	121	122
-290	152	150	122	110	104	109	113	121	132	141	151	154
-300	165	162	139	122	120	114	123	131	142	157	163	166
-310	178	180	161	137	145	143	136	142	155	168	178	179
-320	209	211	197	174	164	158	165	171	178	194	205	212
-325									181			
-330	226	223	213	194	180	167	167	172	**188**	202	214	220
-335								172	188	208	220	**243**
-340	243	239	234	217	205	189	180	**176**	**188**	**212**	**226**	238
-345	247	245					182	**176**	186	204	224	238
-350	252	254	250	232	218	196	**188**	169	177	192	218	242

Eintauchtiefe 5 mm

Temperatur [°C] 23
relative Feuchte [%] 19
äußerer Luftdruck [hPa] 1023

Position [-] / Winkel [°]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-10	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-20	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-30	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-40	76	117	136	135	120	81	49	21	16	18	24	49
-50	17	31	32	29	20	10	4	-2	-3	-2	0	6
-60	3	8	10	11	4	1	-7	-11	-12	-10	-8	-3
-70	-12	-9	-7	-8	-12	-18	-25	-27	-28	-25	-20	-16
-80	-28	-26	-25	-26	-28	-33	-36	-33	-35	-33	-33	-32
-90	-36	-34	-32	-32	-33	-34	-34	-36	-36	-35	-33	-36
-100	-37	-37	-36	-36	-35	-34	-34	-33	-31	-31	-32	-34
-110	-28	-31	-35	-33	-30	-28	-26	-23	-21	-20	-21	-24
-120	-21	-26	-27	-25	-26	-23	-21	-17	-16	-14	-15	-18
-130	-14	-16	-18	-18	-17	-15	-13	-11	-9	-9	-13	-15
-140	-9	-15	-16	-12	-9	-8	-8	-6	-4	0	1	-3
-150	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-160	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-170	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-180	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-190	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-200	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-210	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-220	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-230	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-240	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-250	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-260	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-270	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-280	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-290	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-300	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-310	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-320	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-330	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-340	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-350	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t

Eintauchtiefe 6 mm

Temperatur [°C] 21
relative Feuchte [%] 21
äußerer Luftdruck [hPa] 1016

Position [-] / Winkel [°]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-10	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-20	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-30	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-40	61	88	103	98	79	54	31	19	14	11	15	28
-50	15	28	33	31	21	11	4	0	-3	-1	-1	4
-60	-4	1	3	4	0	-6	-11	-17	-18	-17	-14	-8
-70	-16	-12	-10	-10	-14	-19	-26	-29	-30	-28	-24	-20
-80	-26	-24	-21	-23	-27	-29	-34	-35	-36	-33	-32	-29
-90	-35	-36	-34	-34	-33	-35	-36	-36	-34	-34	-33	-33
-100	-34	-35	-36	-36	-35	-31	-32	-30	-29	-28	-29	-31
-110	-29	-32	-33	-33	-32	-29	-27	-25	-22	-20	-22	-24
-120	-19	-24	-26	-26	-22	-24	-20	-17	-14	-14	-14	-16
-130	-14	-16	-18	-19	-17	-15	-14	-12	-9	-10	-15	-14
-140	-16	-18	-17	-14	-10	-10	-9	-8	-6	-4	-6	-10
-150	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-160	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-170	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-180	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-190	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-200	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-210	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-220	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-230	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-240	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-250	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-260	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-270	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-280	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-290	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-300	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-310	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-320	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-330	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-340	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-350	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t

Eintauchtiefe 7 mm

Temperatur [°C] 23
relative Feuchte [%] 19
äußerer Luftdruck [hPa] 1018

Position [-] / Winkel [°]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-10	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-20	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-30	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-40	51	78	85	82	63	46	32	20	13	11	16	25
-50	22	40	44	44	28	20	12	7	4	2	4	9
-60	-4	4	5	6	2	-4	-8	-13	-16	-15	-12	-8
-70	-10	-6	-4	-2	-7	-11	-16	-21	-23	-23	-19	-14
-80	-27	-23	-21	-20	-24	-28	-32	-34	-35	-34	-31	-29
-90	-36	-36	-35	-33	-35	-34	-36	-35	-34	-32	-31	-33
-100	-35	-38	-38	-35	-34	-34	-34	-33	-32	-31	-31	-33
-110	-27	-31	-34	-33	-32	-29	-26	-23	-20	-19	-20	-24
-120	-19	-24	-26	-27	-25	-23	-21	-18	-15	14	-14	-15
-130	-13	-16	-20	-20	-18	-17	-15	-13	-10	-10	-15	-13
-140	-6	-14	-18	-13	-8	-8	-7	-7	-8	-5	-1	0
-150	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-160	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-170	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-180	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-190	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-200	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-210	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-220	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-230	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-240	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-250	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-260	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-270	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-280	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-290	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-300	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-310	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-320	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-330	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-340	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-350	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t

Eintauchtiefe 8 mm

Temperatur [°C] 22
relative Feuchte [%] 19
äußerer Luftdruck [hPa] 1024

Position [-] / Winkel [°]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-10	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-20	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-30	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-40	68	112	113	114	100	82	56	44	29	29	29	44
-50	11	24	36	33	24	17	11	4	-1	-1	0	2
-60	-5	1	4	4	2	-4	-8	-14	-18	-19	-17	-12
-70	-19	-14	-12	-11	-14	-18	-22	-27	-30	-30	-27	-24
-80	-27	-22	-20	-19	-23	-26	-29	-33	-35	-33	-32	-29
-90	-34	-34	-34	-32	-33	-33	-35	-34	-35	-33	-32	-30
-100	-31	-36	-37	-36	-36	-32	-32	-30	-27	-25	-23	-29
-110	-27	-31	-35	-35	-32	-30	-28	-25	-21	-20	-21	-24
-120	-19	-23	-26	-27	-25	-24	-21	-19	-14	-13	-13	-16
-130	-11	-14	-18	-17	-15	-14	-12	-10	-9	-6	-11	-13
-140	-2	-10	-16	-11	-8	-8	-7	-6	-7	-6	2	4
-150	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-160	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-170	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-180	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-190	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-200	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-210	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-220	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-230	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-240	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-250	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-260	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-270	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-280	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-290	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-300	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-310	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-320	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-330	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-340	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-350	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t

9.8.5 Radius 13,0 mm

Eintauchtiefe 3 mm

Temperatur [°C] 21
relative Feuchte [%] 18
äußerer Luftdruck [hPa] 1020

Position [-] / Winkel [°]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	272	271	269	259	245	232	223	222	213	226	245	266
-5	265	**277**	273	266	254							258
-10	263	272	271	265	252	231	220	198	201	206	224	245
-15		273	**274**	**268**	**256**	**240**						
-20	247	258	266	265	252	233	221	214	202	191	201	222
-25				261	253	236						
-30	180	207	222	230	223	199	161	123	101	118	144	171
-40	130	146	155	156	142	99	49	28	25	36	63	100
-50	53	64	67	64	38	17	7	4	4	7	15	31
-60	9	13	13	10	3	-3	-7	-8	-7	-4	0	4
-70	-6	-5	-6	-8	-13	-19	-23	-23	-22	-17	-13	-8
-80	-18	-17	-19	-22	-27	-30	-33	-33	-31	-29	-24	-20
-90	-30	-31	-33	-34	-35	-35	-35	-35	-34	-33	-30	-31
-100	-35	-36	-37	-37	-37	-37	-34	-34	-33	-32	-32	-34
-110	-29	-30	-31	-30	-28	-26	-24	-21	-22	-21	-22	-25
-120	-21	-21	-21	-20	-19	-17	-16	-15	-14	-13	-15	-18
-130	-15	-18	-17	-15	-13	-12	-12	-11	-10	-8	-8	-10
-140	1	-2	-10	-11	-9	-6	-3	2	7	13	13	8
-150	26	13	0	-4	-4	0	9	19	31	39	43	37
-160	60	50	34	19	17	21	31	46	61	72	75	71
-170	102	92	76	68	58	59	70	83	95	105	113	113
-180	132	128	117	108	97	93	99	105	112	123	135	140
-190	144	140	136	129	124	112	110	95	94	96	116	140
-200	129	136	138	134	127	113	88	73	69	74	97	116
-210	102	105	111	105	95	75	49	44	52	62	80	96
-220	88	86	86	79	65	51	41	39	48	58	74	90
-230	83	68	69	68	57	47	39	38	44	56	67	78
-240	88	65	62	62	58	53	47	49	52	62	69	80
-250	93	69	64	66	64	58	56	58	61	69	75	84
-260	106	91	76	76	76	75	74	76	82	86	88	97
-270	118	111	89	91	92	91	88	92	97	103	106	108
-280	141	144	117	113	115	113	118	124	129	135	139	138
-290	161	165	140	132	132	136	140	144	150	158	163	161
-300	185	188	169	157	154	157	162	168	177	184	190	188
-310	204	206	192	175	172	174	179	186	198	206	211	207
-320	234	233	225	199	195	198	198	206	215	228	237	239
-330	249	247	237	220	209	208	206	210	220	232	248	252
-335									227	235		
-340	264	262	254	239	224	220	218	221	**231**	**243**	256	264
-345	270						**226**	222	230	**243**	**258**	267
-350	268	268	263	248	234	227	218	**223**	228	241	257	265
-355	**274**						220	221			248	**269**

Eintauchtiefe 4 mm

Temperatur [°C] 21
relative Feuchte [%] 26
äußerer Luftdruck [hPa] 1011

Position [-] / Winkel [°]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	**271**	**270**	**268**	**264**	253	**244**	**236**	**222**	220	229	253	**265**
-5	266	268	265	261	251	235	217	205				257
-10	260	265	264	263	**257**	242	222	205	203	209	228	244
-15					251							
-20	243	254	260	262	256	238	220	209	194	181	202	224
-30	192	213	222	232	230	210	164	120	93	112	144	172
-40	135	155	160	159	144	105	52	32	26	37	66	108
-50	49	63	62	55	37	15	6	5	2	4	12	29
-60	11	16	15	13	7	0	-4	-6	-6	-5	-1	4
-70	-11	-10	-11	-14	-18	-23	-27	-29	-27	-24	-20	-16
-80	-18	-18	-18	-21	-26	-29	-32	-33	-32	-29	-26	-22
-90	-34	-33	-35	-35	-37	-38	-37	-36	-35	-34	-33	-34
-100	-33	-36	-34	-36	-35	-33	-31	-29	-27	-27	-28	-30
-110	-25	-27	-29	-28	-26	-24	-21	-19	-18	-18	-19	-23
-120	-20	-22	-22	-22	-20	-18	-17	-15	-13	-13	-14	-17
-130	-14	-16	-16	-14	-13	-12	-11	-10	-10	-10	-9	-10
-140	-3	-8	-12	-13	-10	-8	-6	-2	0	4	5	0
-150	40	32	15	2	2	6	17	28	36	47	52	47
-160	73	60	48	38	32	36	44	57	69	80	88	86
-170	102	89	73	63	56	54	63	78	91	103	111	112
-180	127	119	109	99	89	85	91	99	107	121	131	135
-190	139	134	130	118	112	105	103	103	102	109	127	144
-200	131	133	132	125	115	104	88	73	69	82	103	122
-210	104	102	104	99	87	71	52	48	51	66	85	96
-220	86	82	80	74	59	49	43	43	49	61	78	91
-230	81	63	62	61	52	42	39	40	45	54	67	82
-240	84	61	59	58	53	46	44	45	49	57	65	80
-250	94	71	62	63	60	57	56	60	62	69	76	84
-260	104	89	72	74	73	72	70	74	78	82	88	94
-270	119	114	91	92	91	91	93	97	101	104	108	111
-280	146	151	122	118	119	121	125	132	137	142	144	144
-290	157	160	135	127	129	131	136	140	149	153	156	154
-300	184	187	165	154	153	157	162	168	178	183	189	188
-310	205	206	194	174	171	174	178	187	196	201	208	209
-320	226	224	213	194	186	188	193	199	207	218	228	230
-330	243	242	233	212	205	203	206	210	220	232	242	246
-335										233		
-340	258	254	251	235	220	218	221	219	228	**242**	251	258
-345									227	241	252	
-350	264	262	260	251	238	231	224	219	**230**	240	**254**	264
-355	267	266	261	250		230	219	219	219		250	**265**

9.8.6 Radius 17,0 mm

Eintauchtiefe 3 mm

Temperatur [°C] 24
relative Feuchte [%] 45
äußerer Luftdruck [hPa] 1021

Position [-] / Winkel [°]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	290	290	**286**	**282**	264	256	251	249	256	265	275	**286**
-5	**291**	**292**	**286**	280	**267**	**258**	**253**					**286**
-10	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p
-20	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p
-30	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p
-40	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p
-50	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p
-60	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p
-70	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p
-80	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p
-90	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p
-100	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p
-110	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p
-120	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p
-130	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p
-140	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p
-150	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p
-160	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p
-170	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p
-180	170	161	154	153	139	136	130	135	154	164	170	177
-190	185	182	176	171	164	156	151	163	163	171	182	190
-200	191	184	185	179	175	164	159	161	148	167	181	190
-210	173	176	177	174	166	151	131	125	129	146	158	170
-220	130	128	131	125	113	97	91	87	84	102	112	129
-230	128	107	112	107	100	89	79	81	82	93	109	121
-240	127	97	102	105	94	84	78	76	78	87	100	112
-250	126	97	98	101	95	85	80	80	80	89	97	110
-260	130	109	98	106	99	91	85	86	86	90	100	111
-270	138	137	106	118	114	109	100	105	99	106	112	121
-280	147	160	122	129	134	125	121	122	122	125	130	136
-290	173	191	156	156	163	159	155	158	157	159	161	164
-300	184	201	156	161	175	175	171	173	173	176	177	178
-310	206	217	201	190	195	194	191	194	197	198	200	201
-320	228	265	228	214	220	214	212	218	220	222	227	227
-330	248	251	246	230	226	227	228	231	237	243	247	251
-340	265	265	263	247	243	240	243	242	248	256	262	266
-350	278	278	276	260	253	250	247	250	254	262	272	277
-355	284	285	284	270	257	253	250	**252**	**258**	**268**	**277**	283

Eintauchtiefe 4 mm

Temperatur [°C] 23
relative Feuchte [%] 40
äußerer Luftdruck [hPa] 1022

Position [-] / Winkel [°]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	284	**287**	282	274	265	**266**	255	256	258	**267**	275	**284**
-5	**285**	286	281			258	**256**	251	**263**	263	**278**	281
-10	284	286	**283**	275	270	256	253	**257**	257	263	273	279
-15			281	278	267			244				
-20	280	284	281	**280**	**271**	261	254	256	240	249	267	274
-25				270	267							
-30	262	268	267	267	266	251	238	234	227	209	239	253
-40	234	244	248	256	256	234	208	209	189	178	185	214
-50	173	189	204	200	179	123	79	51	42	41	91	124
-60	91	106	117	105	69	39	16	12	11	14	26	57
-70	10	14	16	11	3	-2	-8	-9	-9	-7	-4	1
-80	-16	-13	-11	-13	-19	-22	-24	-24	-23	-22	-21	-20
-90	-29	-30	-27	-29	-29	-30	-28	-24	-23	-22	-22	-26
-100	-22	-24	-28	-30	-28	-27	-25	-22	-20	-19	-19	-20
-110	-22	-23	-24	-25	-23	-20	-18	-16	-16	-16	-17	-19
-120	-18	-21	-21	-20	-18	-15	-12	-11	-11	-10	-10	-14
-130	20	3	-9	-13	-11	-8	-5	0	3	14	21	26
-140	57	48	32	16	8	7	11	19	26	41	53	59
-150	74	69	54	47	38	35	33	48	61	71	80	82
-160	112	105	96	83	71	71	73	83	90	103	114	118
-170	136	130	127	118	105	102	101	110	120	132	142	143
-180	163	158	153	148	140	132	131	146	149	158	167	171
-190	180	175	169	166	158	159	154	157	163	170	178	188
-200	185	179	177	174	165	163	157	161	166	175	182	190
-210	164	164	165	163	150	138	125	134	141	147	151	162
-220	152	149	151	149	138	130	120	122	124	133	144	152
-230	123	103	106	103	93	83	82	82	85	97	107	120
-240	122	93	97	96	91	83	73	74	77	88	97	112
-250	128	100	93	98	94	86	76	77	78	87	95	109
-260	161	179	140	145	147	141	141	137	137	140	144	147
-270	147	151	111	121	121	117	109	109	110	115	118	124
-280	158	176	135	138	139	134	131	128	128	130	135	144
-290	176	196	165	165	166	162	159	159	159	160	163	168
-300	203	215	200	191	193	191	194	192	191	190	191	194
-310	217	225	215	204	207	206	208	208	210	210	215	213
-320	235	239	237	221	223	222	219	226	229	234	236	238
-330	252	253	249	236	233	227	230	239	238	250	252	255
-340	271	266	262	249	245	245	239	244	250	256	264	267
-350	275	281	270	257	248	246	241	253	248	259	269	273
-355	280	281				251	244		257	263	273	279

Eintauchtiefe 5 mm

Temperatur [°C] 23
relative Feuchte [%] 47
äußerer Luftdruck [hPa] 1017

Position [-] / Winkel [°]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	**284**	283	280	**281**	265	256	255	259	260	266	276	**282**
-5	283	**284**	**282**	275	270	263		259	**261**	**268**	275	280
-10	282	**284**	**282**	279	**272**	264	258	**263**	**261**	265	**277**	278
-15		282	280		**272**	**267**	**260**	261	258		263	
-20	274	277	279	279	**272**	263	259	261	255	245	256	263
-25					268		252					
-30	253	258	257	258	263	261	254	253	240	231	229	242
-40	232	240	241	244	248	240	203	191	184	185	188	218
-50	232	239	242	244	253	243	211	210	188	174	195	220
-60	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-70	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-80	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-90	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-100	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-110	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-120	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-130	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-140	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-150	100	95	86	76	64	60	63	79	82	92	103	106
-160	112	108	102	85	85	81	76	85	92	105	116	119
-170	130	127	118	109	99	103	99	107	119	129	137	140
-180	161	154	150	142	137	132	134	141	147	158	165	168
-190	170	165	160	152	144	144	144	151	157	166	173	177
-200	181	176	172	171	165	161	156	162	165	172	178	186
-210	163	161	162	158	148	141	131	140	138	143	156	162
-220	137	137	138	136	127	117	106	113	106	119	131	141
-230	118	109	108	104	95	86	76	83	93	94	108	120
-240	116	84	88	87	82	71	68	70	74	80	91	102
-250	122	94	87	91	84	77	70	72	75	85	94	107
-260	134	127	97	103	97	92	86	87	88	98	105	115
-270	142	148	108	114	110	106	98	98	102	107	117	123
-280	161	184	142	144	143	138	131	130	133	138	145	149
-290	177	199	164	163	162	160	156	154	154	158	163	166
-300	195	215	198	186	187	184	183	180	182	185	189	190
-310	216	227	220	207	206	205	203	203	205	208	211	212
-320	235	242	241	225	221	221	223	222	227	230	233	234
-330	253	255	257	241	237	234	236	237	238	248	252	253
-340	268	267	266	252	251	246	244	249	249	258	265	269
-350	278	277	275	266	257	255	251	253	257	264	271	276
-355	281			269						267		279

Eintauchtiefe 6 mm

Temperatur [°C] 23
relative Feuchte [%] 32
äußerer Luftdruck [hPa] 1026

Position [-] / Winkel [°]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	280	**280**	276	272	264	262	256	259	**261**	264	**272**	**276**
-5	**281**	279	**280**	275	265				260	**265**	270	**276**
-10	277	279	279	**278**	269	262	260	262	**261**	262	267	270
-15			273	273	270	267	259	257	256			
-20	257	261	263	269	**271**	**270**	**267**	**266**	**261**	248	240	256
-25					254	256	256	254	246			
-30	240	243	243	243	243	245	239	235	231	232	233	236
-40	216	218	213	205	223	206	211	194	184	168	186	206
-50	184	192	200	205	217	215	210	204	183	170	177	175
-60	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-70	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-80	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-90	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-100	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-110	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-120	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-130	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-140	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-150	107	101	93	79	73	76	79	88	98	104	112	113
-160	115	111	104	101	91	88	84	95	102	109	120	123
-170	132	125	118	110	104	101	101	108	119	128	137	140
-180	159	153	147	144	135	136	137	141	151	156	164	167
-190	172	166	161	156	153	148	151	156	161	170	176	181
-200	177	170	169	167	161	155	157	162	166	170	177	184
-210	161	158	157	156	148	142	133	137	145	147	155	162
-220	132	133	134	130	123	117	108	116	118	127	135	141
-230	112	86	89	88	80	76	72	73	80	84	96	109
-240	110	77	81	78	74	70	63	69	74	82	92	103
-250	115	86	78	78	74	71	65	70	73	79	88	98
-260	122	106	85	89	82	77	72	76	80	86	96	104
-270	131	136	98	101	95	92	87	90	92	99	107	115
-280	153	173	130	131	125	124	119	120	124	127	136	142
-290	171	193	162	156	150	147	146	144	149	151	159	163
-300	190	210	189	181	176	173	171	171	175	178	184	187
-310	208	223	216	201	197	196	195	194	197	200	205	206
-320	248	250	253	239	233	233	233	236	238	242	247	248
-330	262	264	262	254	246	244	245	246	247	252	257	264
-340	272	272	272	263	254	251	248	252	255	260	266	272
-350	273	273	272	262	254	250	246	252	255	258	266	273
-355	278	276							257	259	271	274

Eintauchtiefe 7 mm

Temperatur [°C] 21
relative Feuchte [%] 33
äußerer Luftdruck [hPa] 1024

Position [-] / Winkel [°]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	**278**	**279**	**277**	**275**	268	261	258	261	259	**262**	**268**	**274**
-5	**278**	277	276	268	269	260	259			260	265	270
-10	275	276	**277**	237	**271**	**268**	**263**	265	263	261	262	267
-15			269			266	263	261	258			
-20	251	255	258	264	266	**268**	**263**	**266**	**265**	260	250	248
-25						247	249	248	242			
-30	231	234	230	229	228	229	223	223	219	222	220	220
-40	195	202	201	201	222	217	211	199	181	171	170	190
-50	197	205	204	201	221	218	210	201	192	162	169	190
-60	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-70	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-80	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-90	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-100	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-110	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-120	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-130	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-140	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-150	104	98	88	77	72	75	76	86	95	106	114	112
-160	113	108	100	88	82	83	81	95	104	112	119	121
-170	141	131	123	111	108	102	106	117	128	138	145	148
-180	156	150	144	132	129	127	127	135	145	153	160	164
-190	166	158	154	149	144	142	144	152	159	167	172	175
-200	172	168	164	162	156	151	151	159	163	169	176	181
-210	160	157	158	155	147	142	134	141	144	149	159	160
-220	116	125	124	121	113	109	101	108	113	119	128	129
-230	107	86	86	84	78	71	69	73	80	88	99	108
-240	107	73	75	73	73	65	61	63	67	78	90	99
-250	110	77	74	73	69	64	59	64	67	77	87	96
-260	118	98	78	81	74	68	64	72	74	84	94	102
-270	129	129	93	95	86	86	82	88	90	96	108	113
-280	153	171	128	130	123	118	114	117	122	128	138	143
-290	171	190	155	154	149	141	139	140	143	148	158	163
-300	189	206	184	175	170	166	164	164	168	171	179	184
-310	232	238	239	224	220	217	216	217	220	224	229	231
-320	231	237	237	221	234	219	216	218	220	223	229	227
-330	245	248	250	237	246	230	226	231	233	238	244	246
-340	261	261	264	251	253	240	241	245	241	248	256	259
-350	268	270	265	259		251	247	248	249	255	262	268
-355	274	272	271	262	266					257	263	271

Eintauchtiefe 8 mm

Temperatur [°C] 20
relative Feuchte [%] 32
äußerer Luftdruck [hPa] 1022

Position [-] / Winkel [°]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	285	**288**	**291**	**288**	281	277	272	272	270	**273**	**276**	**282**
-5	284	**288**	289	287	**283**	**280**	277	**277**		271	275	278
-10	280	283	287	286	**283**	**280**	277	275	274	**273**	269	274
-15					279	279	**278**	276	274			
-20	257	261	262	273	278	278	276	274	**276**	269	255	254
-25									242			
-30	232	235	234	235	249	254	255	245	234	230	222	220
-40	220	227	225	221	252	254	256	252	234	206	212	203
-50	219	222	222	222	246	250	257	246	226	220	206	212
-60	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-70	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-80	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-90	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-100	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-110	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-120	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-130	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-140	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-150	111	107	99	89	81	83	85	96	104	117	121	121
-160	125	118	109	100	89	88	91	102	110	124	131	131
-170	145	137	133	119	117	112	113	120	135	147	154	154
-180	162	159	153	148	140	137	138	148	154	164	170	170
-190	177	171	168	164	159	156	157	159	168	176	180	184
-200	182	174	172	169	163	163	160	163	169	175	182	188
-210	165	164	165	162	158	150	145	148	152	158	165	168
-220	143	139	141	140	132	126	120	125	129	136	143	147
-230	122	105	108	106	97	91	86	91	97	105	116	124
-240	118	87	92	91	85	79	74	78	83	91	102	113
-250	122	90	85	84	77	73	68	69	89	86	102	110
-260	131	110	89	90	82	79	74	81	85	94	107	116
-270	143	139	100	106	96	91	86	93	99	107	12	130
-280	162	173	124	128	119	114	109	113	120	130	144	150
-290	182	196	158	157	152	144	139	141	146	158	169	175
-300	203	218	190	182	179	171	169	168	177	179	191	197
-310	225	237	224	208	205	199	198	197	202	209	215	221
-320	244	250	248	232	228	224	221	221	224	231	236	242
-330	259	264	264	250	246	243	239	238	241	246	250	254
-340	269	275	278	268	263	253	254	253	254	261	265	270
-350	280	280	285	279	274	266	264	263	264	267	274	279
-355	**287**	**288**	288	282						271	276	281

Eintauchtiefe 9 mm

Temperatur [°C] 20
relative Feuchte [%] 29
äußerer Luftdruck [hPa] 1032

Position [-] / Winkel [°]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	**279**	**282**	**284**	**287**	**278**	**277**	272	270	267	269	**272**	**274**
-5	276	278	280	279	277	273	270	268	266	266	259	270
-10	273	276	278	280	**278**	276	**275**	**275**	**272**	**271**	270	268
-15					269		270	271	270	269		
-20	255	259	261	267	271	273	274	271	270	266	253	251
-30	221	225	223	226	257	264	264	255	234	224	218	215
-40	211	217	217	218	259	265	265	258	233	217	209	202
-50	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-60	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-70	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-80	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-90	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-100	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-110	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-120	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-130	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-140	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-150	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-160	125	119	103	100	94	92	96	106	119	130	133	135
-170	146	138	126	121	114	112	114	124	134	145	152	152
-180	164	151	148	142	139	139	139	149	155	164	169	171
-190	176	169	165	160	156	153	155	162	169	177	180	185
-200	175	171	169	163	159	157	157	162	171	175	181	187
-210	168	164	165	162	157	153	148	154	158	160	167	172
-220	133	130	131	131	125	120	116	119	127	131	137	142
-230	120	103	106	103	100	95	89	95	100	109	116	121
-240	119	86	92	91	86	84	77	83	88	100	107	115
-250	125	88	86	85	79	74	71	78	85	97	108	116
-260	133	107	88	87	82	79	74	80	91	104	115	122
-270	142	133	98	96	92	89	83	93	99	113	127	131
-280	161	177	124	130	122	117	111	112	121	132	146	156
-290	183	198	152	151	145	138	130	132	141	152	167	175
-300	204	219	192	184	179	169	164	165	174	180	193	201
-310	226	235	223	205	201	193	187	188	194	199	210	219
-320	244	251	249	230	228	221	218	217	223	225	232	238
-330	258	264	265	250	248	242	238	237	239	242	248	253
-340	269	272	277	267	262	257	252	250	252	254	259	265
-350	276	278	283	277	273	268	265	263	261	265	268	272
-355	278	280	283	278	274	271					269	273

Eintauchtiefe 10 mm

Temperatur [°C] 20
relative Feuchte [%] 27
äußerer Luftdruck [hPa] 1028

Position [-] / Winkel [°]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	277	280	284	283	278	**278**	271	268	267	267	270	274
-5	272				276	277	**275**	**274**	**272**	**271**	**270**	272
-10	271	273	277	279	275	276	273	271	269	269	268	268
-15							268	268	268	270		
-20	246	248	251	257	261	266	263	264	264	263	256	246
-30	221	226	226	229	233	248	251	257	247	246	230	224
-40	213	217	218	219						229	214	214
-50	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-60	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-70	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-80	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-90	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-100	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-110	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-120	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-130	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-140	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-150	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-160	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-170	139	133	120	107	104	105	106	114	127	138	146	146
-180	152	145	136	129	124	120	125	132	141	151	158	157
-190	165	158	151	145	141	139	140	147	154	164	171	170
-200	168	164	160	153	150	147	149	154	162	170	176	179
-210	155	151	148	147	141	137	132	139	145	152	156	158
-220	119	120	121	118	111	107	100	106	115	121	126	124
-230	105	88	91	91	86	84	80	83	92	101	106	112
-240	117	77	78	75	71	71	66	71	77	92	102	109
-250	124	86	76	72	68	60	63	71	78	95	105	117
-260	137	113	86	83	77	73	70	78	89	102	118	125
-270	147	136	98	97	89	85	81	90	99	109	129	138
-280	177	184	137	132	129	120	115	118	129	141	154	166
-290	197	207	167	160	154	144	140	142	152	157	172	185
-300	216	227	202	187	181	174	166	166	172	181	195	206
-310	235	246	234	217	210	201	197	197	202	209	218	228
-320	249	259	256	238	234	226	221	220	223	229	235	242
-330	263	272	273	261	257	250	246	244	244	250	254	258
-340	274	278	284	278	273	266	263	260	260	263	268	267
-345		280	284	279	277							
-350	276	**283**	**286**	**284**	278	276	271	267	266	266	271	273
-355	**279**	281	282	**284**	**279**	277					**270**	**275**

Eintauchtiefe 11 mm

Temperatur [°C] 20
relative Feuchte [%] 26
äußerer Luftdruck [hPa] 1008

Position [-] / Winkel [°]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	**276**	**280**	282	**283**	279	**279**	**276**	**273**	**272**	271	270	273
-5	266	268		272	275	275	272	**273**	**272**	**273**	**271**	266
-10	262	261	263	269	271	273	271	271	271	271	266	263
-15										267		
-20	234	237	241	247	247	258	258	258	262	263	257	236
-30	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-40	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-50	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-60	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-70	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-80	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-90	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-100	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-110	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-120	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-130	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-140	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-150	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-160	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-170	136	130	119	107	95	97	98	107	118	126	141	139
-180	150	143	131	124	120	121	120	128	136	148	158	160
-190	169	158	150	146	141	142	143	145	156	167	174	176
-200	170	161	156	154	147	149	145	150	159	166	175	178
-210	153	149	152	149	144	143	140	145	153	158	162	160
-220	111	117	116	114	112	110	107	112	118	127	131	123
-230	113	81	85	81	81	85	79	87	91	104	112	119
-240	120	73	71	72	68	67	67	74	83	95	107	116
-250	131	91	74	70	65	59	60	65	79	98	109	119
-260	140	113	83	78	74	70	60	74	84	98	114	128
-270	153	146	99	98	91	88	79	87	98	109	126	140
-280	179	189	139	131	127	117	108	108	119	132	148	165
-290	197	207	166	155	149	139	132	132	137	148	169	183
-300	212	225	196	182	172	163	155	149	158	169	181	196
-310	231	245	234	214	206	197	188	183	184	191	205	217
-320	247	259	258	240	235	223	216	207	208	214	223	235
-330	258	269	274	260	254	245	237	231	229	232	239	249
-335			279									
-340	270	277	283	278	273	267	261	257	254	257	262	265
-345		279	**284**									
-350	275	**280**	**283**	**282**	**278**	274	269	265	265	265	266	271
-355	275	277	**284**	**283**	**282**	277	274	270	270	269	270	**275**

Eintauchtiefe 12 mm

Temperatur [°C] 21
relative Feuchte [%] 26
äußerer Luftdruck [hPa] 999

Position [-] / Winkel [°]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	274	275	280	283	283	**283**	**280**	**279**	277	275	**274**	272
-5	261				277	279	278	278	**279**	**278**	273	265
-15										273		
-10	264	265	267	273	275	277	277	276	275	275	271	265
-20	235	239	240	247	263	267	270	259	260	264	265	248
-30	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-40	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-50	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-60	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-70	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-80	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-90	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-100	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-110	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-120	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-130	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-140	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-150	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-160	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-170	135	124	114	103	94	94	96	104	120	131	140	144
-180	151	140	130	126	118	117	122	128	139	151	157	161
-190	163	155	147	141	138	136	140	144	158	165	172	175
-200	169	157	154	151	147	146	146	151	160	172	176	179
-210	146	138	141	141	139	139	140	142	149	158	160	155
-220	114	109	110	112	109	109	107	116	125	133	136	132
-230	113	80	79	81	79	82	84	94	102	113	120	123
-240	122	77	68	65	62	60	64	74	88	104	114	119
-250	124	91	74	69	64	55	57	65	78	95	108	120
-260	138	111	82	79	73	66	62	67	80	98	111	125
-270	151	145	100	96	91	85	78	84	91	109	123	138
-280	174	183	137	130	125	120	111	112	120	132	145	159
-290	199	213	176	162	157	149	141	139	143	156	170	183
-300	215	229	205	188	180	172	165	161	162	170	187	201
-310	236	249	243	225	215	207	196	189	190	195	206	221
-320	247	261	261	242	234	224	214	206	203	208	219	233
-330	259	271	277	266	258	249	239	232	230	230	236	246
-340	267	276	284	281	276	270	262	257	251	253	249	260
-345		**279**	**288**	285	282							
-350	271	278	285	285	283	280	276	271	267	266	266	267
-355	**275**	**279**	286	**287**	**285**	**283**	**280**	277	275	274	272	**273**

Eintauchtiefe 13 mm

Temperatur [°C] 23
relative Feuchte [%] 25
äußerer Luftdruck [hPa] 1014

Position [-] / Winkel [°]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	265	270	278	283	285	**284**	**282**	**281**	**280**	**279**	**274**	**271**
-5	258				283	283	**282**	**281**	**280**	277	273	264
-10	254	256	264	272	278	278	278	279	**280**	**279**	**274**	258
-15									275	276	268	
-20	236	236	239	244	256	261	262	261	263	268	265	241
-30	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-40	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-50	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-60	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-70	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-80	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-90	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-100	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-110	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-120	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-130	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-140	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-150	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-160	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-170	131	117	108	97	91	96	101	110	122	132	142	143
-180	150	136	127	118	116	115	117	131	141	150	159	162
-190	162	151	143	138	136	135	133	147	155	165	171	173
-200	167	155	151	147	143	140	140	153	163	172	178	180
-210	143	133	133	133	132	127	132	145	158	166	167	161
-220	111	101	100	101	98	94	101	114	129	134	137	131
-230	110	77	70	66	65	66	71	81	101	113	120	120
-240	115	76	70	64	58	56	61	71	85	100	110	114
-250	122	87	71	68	61	52	54	59	73	88	101	112
-260	129	103	79	77	67	59	54	64	71	86	100	115
-270	140	135	96	97	91	81	78	81	86	99	112	126
-280	169	183	140	135	132	122	118	121	124	133	140	155
-290	185	200	164	152	143	143	139	143	143	150	160	168
-300	204	217	195	182	177	171	166	168	170	173	183	190
-310	227	240	231	214	210	204	195	193	193	198	206	215
-320	241	254	253	238	233	226	218	212	210	214	219	230
-330	255	270	274	265	260	254	245	239	232	232	235	245
-335		273										
-340	262	274	282	277	273	270	262	255	250	247	247	253
-345	**266**	**276**	**285**	284								
-350	265	273	283	286	284	280	277	273	268	264	260	262
-355	265		282	**286**	**286**	**284**	281	278	274	269	265	263

Eintauchtiefe 14 mm

Temperatur [°C] 22
relative Feuchte [%] 23
äußerer Luftdruck [hPa] 1014

Position [-] / Winkel [°]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	263	262	270	275	**280**	**280**	**280**	**280**	**281**	279	274	266
-5					276	277	277	279	280	**281**	**276**	**267**
-10	249	246	258	269	272	274	276	276	278	280	275	264
-15										272	267	
-20	231	223	226	231	250	250	253	249	246	267	248	252
-30	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-40	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-50	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-60	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-70	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-80	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-90	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-100	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-110	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-120	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-130	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-140	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-150	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-160	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-170	131	116	104	90	89	88	90	105	120	133	142	144
-180	143	130	120	113	109	105	109	125	136	148	153	155
-190	158	145	137	135	129	128	132	142	154	162	169	170
-200	163	151	145	141	137	136	137	146	158	166	174	176
-210	133	120	116	110	106	109	109	123	140	151	155	150
-220	113	99	93	88	82	79	79	91	109	124	131	130
-230	104	83	75	69	62	58	56	66	80	94	105	112
-240	99	65	57	53	48	43	41	46	55	70	85	95
-250	101	68	52	50	74	54	50	54	53	65	79	88
-260	108	82	56	57	57	55	52	61	60	70	84	92
-270	132	128	81	77	80	83	81	88	88	96	112	115
-280	162	174	124	108	108	117	118	121	124	124	139	149
-290	185	200	164	151	147	148	151	156	161	166	176	179
-300	206	221	198	184	181	184	189	193	198	196	202	202
-310	230	240	231	216	213	212	215	220	224	225	224	228
-320	246	253	250	237	235	233	229	233	236	238	238	242
-330	256	263	264	254	253	251	246	244	246	245	248	250
-335	260											
-340	**265**	271	275	268	267	266	264	260	258	258	259	260
-345	264	**272**	278	274								
-350	**265**	**272**	**280**	281	279	279	276	275	271	270	266	264
-355	262	267	279	**282**	**280**	**280**	279	278	277			264

Eintauchtiefe 15 mm

Temperatur [°C] 18
relative Feuchte [%] 41
äußerer Luftdruck [hPa] 1001

Position [-] / Winkel [°]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	273	274	278	**277**	**276**	276	238	280	**283**	**283**	278	278
-5				267	269	271	272	276	278	281		
-10	252	246	250	260	262	265	268	271	276	280	278	265
-20	228	222	221	225	235	239	243	233	245	255	257	241
-30	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-40	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-50	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-60	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-70	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-80	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-90	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-100	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-110	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-120	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-130	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-140	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-150	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-160	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-170	133	118	104	92	87	85	90	103	119	130	142	145
-180	143	131	121	114	109	106	111	123	135	143	152	155
-190	154	143	135	129	124	124	124	135	147	156	163	166
-200	156	144	137	131	129	126	128	135	148	158	165	167
-210	135	133	137	131	129	125	126	136	149	156	147	145
-220	153	140	134	128	122	119	119	128	139	149	158	160
-230	136	130	118	116	109	107	103	113	126	137	147	150
-240	90	79	73	61	52	47	42	47	64	82	96	101
-250	78	53	29	22	27	18	13	20	30	51	68	72
-260	89	63	39	28	35	36	30	38	34	48	60	70
-270	110	103	54	53	65	68	65	73	66	71	84	89
-280	148	162	107	100	109	118	118	121	122	120	132	134
-290	180	196	151	170	143	152	155	158	164	160	168	172
-300	203	217	187	202	170	176	183	185	190	189	194	199
-310	227	238	223	235	199	201	206	210	217	210	219	224
-320	252	257	256	258	230	229	231	236	241	247	247	250
-330	269	271	271	274	254	253	251	253	259	263	267	269
-335	278	276										
-340	**281**	**281**	279	276	270	270	266	267	270	275	278	**281**
-345	**281**	280	**280**								279	**281**
-350	279	279	**280**		275	275	276	278	278	280	280	280
-355			278	276	275	**277**	**278**	**280**	281	**283**	**283**	279

9.8.7 Radius 26,5 mm

Eintauchtiefe 3 mm

Temperatur [°C] 23
relative Feuchte [%] 62
äußerer Luftdruck [hPa] 1017

Position [-] / Winkel [°]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	**351**	351	356	**354**	**349**	**346**	342	**344**	344	350	**349**	**350**
-5	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p
-10	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p
-20	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p
-30	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p
-40	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p
-50	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p
-60	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p
-70	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p
-80	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p
-90	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p
-100	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p
-110	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p
-120	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p
-130	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p
-140	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p
-150	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p
-160	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p
-170	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p
-180	253	241	240	239	232	226	228	228	234	241	252	254
-190	263	241	245	239	237	227	225	241	241	251	257	262
-200	265	237	242	235	228	232	232	242	246	251	256	260
-210	270	239	232	232	210	221	218	221	247	241	261	265
-220	241	204	221	219	227	219	217	222	225	234	241	241
-230	214	179	207	206	198	186	169	193	200	210	217	219
-240	195	142	184	182	165	171	151	171	169	177	191	187
-250	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-260	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-270	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-280	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-290	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-300	283	315	251	242	269	269	238	264	248	273	259	274
-310	298	318	266	257	272	279	269	273	265	281	275	287
-320	331	345	343	316	316	319	314	328	323	325	326	324
-330	338	348	356	329	330	329	327	337	333	331	333	332
-335		351	**367**									
-340	344	**353**	364	345	347	343	336	343	345	336	342	339
-345		349	365				342		346	343		
-350	346	349	355	351	338	342	**343**	341	**350**	**352**	344	346
-355	346			349	343	341	341	343	345	347	343	344

Eintauchtiefe 4 mm

Temperatur [°C] 21
relative Feuchte [%] 55
äußerer Luftdruck [hPa] 1021

Position [-] / Winkel [°]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	**350**	**352**	355	353	347	340	341	342	338	347	**349**	**348**
-5	340	339									336	337
-10	338	340	342	344	333	330	321	328	332	333	333	336
-20	332	331	329	330	324	321	320	324	323	324	326	330
-30	325	328	325	325	319	314	311	310	313	318	320	324
-40	313	310	308	306	305	302	298	297	296	307	309	310
-50	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p
-60	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p
-70	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p
-80	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p
-90	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p
-100	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p
-110	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p
-120	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p
-130	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p
-140	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p
-150	210	205	200	198	182	153	169	192	190	198	207	211
-160	226	221	221	212	210	203	193	205	212	219	226	231
-170	233	226	227	221	214	212	213	213	220	224	228	238
-180	247	236	233	237	235	228	228	228	236	237	243	250
-190	250	230	237	240	222	231	216	224	233	237	252	254
-200	257	233	237	227	218	225	226	236	242	247	252	254
-210	261	225	240	226	234	233	228	227	241	246	250	258
-220	248	202	216	218	223	220	219	228	224	239	239	237
-230	226	193	214	209	201	213	218	205	201	232	228	228
-240	197	144	191	173	160	172	158	184	178	196	191	186
-250	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-260	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-270	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-280	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-290	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-300	263	304	245	243	267	245	233	250	236	244	231	253
-310	308	318	281	261	295	295	281	288	271	285	281	295
-320	334	338	346	309	321	322	318	326	312	319	319	318
-330	340	350	360	334	340	331	325	337	330	328	330	332
-335			**369**	353	356	347	339					
-340	337	347	363	**355**	**358**	**351**	341	332	336	343	341	340
-345			359	354	351	348	**343**	342	341	341		
-350	346	349	360	**355**	351	348	341	**346**	**349**	**351**	348	345
-355	343	345		346			341	341	342	344	342	342

Eintauchtiefe 5 mm

Temperatur [°C] 21
relative Feuchte [%] 59
äußerer Luftdruck [hPa] 1022

Position [-] / Winkel [°]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	343	347	344	350	340	339	328	332	340	339	341	343
-10	344	345	343	342	333	325	324	330	326	332	334	337
-20	324	327	324	331	324	316	323	324	321	321	319	324
-30	317	321	320	320	315	310	307	306	307	311	312	312
-40	308	304	297	300	294	290	291	290	294	288	297	305
-50	289	288	286	285	286	281	277	280	280	274	283	283
-60	253	256	252	257	254	248	245	240	238	232	240	246
-70	177	181	180	185	180	168	159	155	147	142	148	162
-80	84	81	63	79	64	61	51	34	67	60	53	63
-90	29	21	4	-10	1	-28	-35	1	-9	6	15	24
-100	61	48	47	39	35	21	20	29	40	51	63	64
-110	85	75	68	60	49	41	42	50	64	70	80	86
-120	109	100	88	86	76	72	71	73	83	95	104	112
-130	142	130	124	121	108	100	107	109	120	131	139	144
-140	174	160	150	146	143	150	121	158	155	171	173	180
-150	201	189	197	178	164	166	170	173	187	194	201	204
-160	223	211	207	217	194	191	193	195	212	215	222	231
-170	229	223	222	218	202	206	198	199	211	218	226	230
-180	238	229	232	233	219	218	224	216	222	233	234	242
-190	248	234	240	245	228	222	228	235	236	245	244	255
-200	260	231	239	232	228	224	239	233	241	251	252	259
-210	251	218	222	232	231	214	219	228	231	241	243	250
-220	235	201	199	215	218	200	210	206	216	235	222	238
-230	214	173	177	194	201	183	198	185	198	216	203	223
-240	181	140	172	158	154	125	141	164	145	183	163	185
-250	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-260	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-270	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-280	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-290	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-300	263	312	257	272	284	251	264	258	243	245	205	264
-310	290	323	285	262	304	291	297	278	267	278	253	285
-315		322					302					294
-320	332	**357**	345	325	337	319	**359**	336	331	333	323	**356**
-325	333	338	357		332	323	347	327		325		337
-330	**348**	352	**386**	341	**364**	**346**	340	**350**	345	**349**	338	355
-335	340		379	350	358	338		337		337		
-340	344	347	371	**362**	361	343	347	337	341	345	339	341
-345				353					335		337	
-350	344	347	364	359	333	335	340	331	**346**	343	**348**	345
-355									338		339	

Eintauchtiefe 6 mm

Temperatur [°C] 23
relative Feuchte [%] 62
äußerer Luftdruck [hPa] 1020

Position [-] / Winkel [°]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	343	343	344	347	334	330	330	334	335	334	342	343
-10	330	330	326	330	323	322	320	321	324	322	330	328
-20	319	318	317	322	318	318	309	311	307	313	316	315
-30	304	308	302	304	301	302	291	295	293	297	300	300
-40	296	293	292	287	285	285	277	282	283	282	290	293
-50	273	277	269	269	272	261	260	251	255	261	267	271
-60	246	246	244	241	240	236	224	218	217	220	231	240
-70	173	171	169	166	159	145	127	121	125	131	150	158
-80	100	121	143	31	48	61	47	21	-7	85	81	88
-90	24	24	7	-3	-13	-21	-28	-24	-14	1	96	20
-100	76	33	30	22	14	4	2	7	11	61	60	73
-110	87	78	68	61	55	47	44	56	66	76	82	88
-120	114	100	90	79	71	62	62	73	86	97	105	113
-130	140	128	119	112	101	101	98	108	116	134	142	144
-140	178	168	157	148	140	137	135	146	159	164	172	181
-150	199	197	190	183	177	171	174	172	185	195	204	209
-160	222	214	210	203	197	191	191	189	202	212	219	228
-170	227	216	218	206	205	200	196	201	208	218	228	230
-180	236	224	225	221	214	213	206	216	224	230	230	241
-190	248	232	233	228	230	222	216	226	231	235	245	248
-200	257	226	233	228	233	225	229	223	232	239	242	253
-210	237	207	186	218	220	204	209	211	215	239	220	238
-220	213	198	155	206	212	184	199	174	204	219	205	233
-230	192	156	136	172	185	160	179	143	190	202	185	214
-240	133	132	160	148	150	107	136	91	137	166	133	171
-250	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-260	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-270	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-280	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-290	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-300	266	333	262	305	272	271	267	247	280	256	296	277
-305											407	
-310	288	351	273	319	299	272	297	272	308	279	**640**	303
-315		361		328			324		328		295	
-320	328	**406**	342	**560**	334	313	**388**	318	**403**	343	319	366
-325	335	377	359	347			375	321	339	335		362
-330	**346**	356	**388**	349	352	333	358	**340**	334	**355**	332	**381**
-335	336		385		355			331		336		346
-340	345	346	369	359	**371**	340	343	343	334	342	339	344
-345					357	**344**						
-350	345	339	349	351	354	**344**	337	332	340	333	339	345
-355						337						

Eintauchtiefe 7 mm

Temperatur [°C] 23
relative Feuchte [%] 47
äußerer Luftdruck [hPa] 1019

Position [-] / Winkel [°]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	334	336	342	344	334	326	325	331	331	332	332	333
-5								325				
-10	330	327	326	331	328	325	323	325	326	323	325	326
-20	313	312	311	313	314	309	308	308	308	303	311	308
-30	304	306	299	300	297	294	286	287	291	292	296	300
-40	296	295	290	291	292	285	281	287	287	287	297	292
-50	272	273	267	270	265	265	253	254	261	262	267	271
-60	232	231	229	233	226	222	212	209	211	219	223	229
-70	164	168	161	160	152	137	116	116	131	141	148	155
-80	110	126	27	55	83	84	67	38	2	113	88	98
-90	18	13	0	-11	-20	-28	-24	-14	-14	0	83	97
-100	71	81	27	19	12	6	3	8	11	60	65	79
-110	92	79	68	61	51	47	47	55	67	79	89	96
-120	113	100	87	76	65	65	64	77	91	101	110	116
-130	147	135	126	118	110	106	102	115	130	134	144	151
-140	172	160	150	147	135	130	135	139	155	162	170	176
-150	200	190	187	177	171	169	166	175	183	192	200	204
-160	214	207	201	196	185	185	181	191	191	207	215	217
-170	223	213	214	208	197	199	189	193	205	217	224	228
-180	236	226	220	217	213	209	202	213	224	228	234	239
-190	246	230	232	226	226	220	215	225	230	238	241	247
-200	252	224	223	224	223	220	222	219	231	235	236	245
-210	234	209	179	214	221	200	209	200	217	235	215	237
-220	209	193	134	203	213	181	197	162	203	218	200	227
-230	184	157	114	176	188	147	183	130	183	203	181	214
-240	142	131	110	154	157	113	143	109	142	176	131	184
-250	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-260	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-270	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-280	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-290	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-300	258	328	260	280	245	308	249	227	271	253	339	264
-305											462	
-310	301	373	287	343	292	280	312	283	366	301	**470**	323
-315		378		366			316		379		306	
-320	325	**414**	329	560	313	300	369	308	422	332	319	359
-325	324	410	342	**646**			**374**		**425**	333	312	368
-330	**346**	358	**382**	341	348	322	350	327	339	**352**	334	**385**
-335	331		364		356	330		328		344	319	380
-340	343	313	376	349	**366**	**338**	331	**331**	333	347	332	351
-345					356	**338**		325				
-350	337	339	344	343	341	336	332	328	332	331	330	338
-355								329				

Eintauchtiefe 8 mm

Temperatur [°C] 23
relative Feuchte [%] 50
äußerer Luftdruck [hPa] 1010

Position [-] / Winkel [°]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	333	339	341	345	335	329	322	328	332	326	328	334
-10	323	322	323	326	326	322	316	322	323	325	321	323
-20	312	309	309	313	309	307	301	303	304	308	306	308
-30	299	300	295	298	296	292	285	284	285	290	292	296
-40	290	287	284	290	279	277	274	271	273	278	285	288
-50	272	271	266	266	261	260	256	257	260	259	266	270
-60	234	232	227	228	224	220	212	206	213	215	223	230
-70	182	189	181	177	170	162	149	147	149	157	165	176
-80	115	123	140	69	106	111	103	57	18	122	103	108
-90	112	133	-9	-13	-19	-26	-26	-13	-13	-4	5	100
-100	80	78	27	19	47	41	43	15	11	59	75	83
-110	91	79	66	57	46	44	45	57	67	73	87	93
-120	109	96	81	67	62	58	59	72	85	96	106	111
-130	144	135	124	109	102	104	100	112	124	131	143	150
-140	174	161	150	142	142	138	141	157	157	164	172	177
-150	202	193	189	183	169	165	168	175	185	192	201	207
-160	212	208	203	195	187	183	182	194	200	205	212	219
-170	221	213	211	202	199	192	197	200	207	216	220	226
-180	229	219	220	214	206	200	200	208	219	224	230	233
-190	241	225	224	219	218	212	210	221	225	227	234	241
-200	248	220	221	217	219	212	214	220	229	233	236	244
-210	229	203	184	215	216	195	208	198	215	227	211	233
-220	215	199	175	210	216	192	202	187	210	222	202	227
-230	186	164	155	179	190	156	181	140	184	200	176	209
-240	140	127	152	152	156	123	141	95	146	168	128	174
-250	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-260	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-270	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-280	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-290	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-300	254	298	241	228	238	233	235	235	251	249	205	254
-310	287	328	268	273	266	265	272	269	317	285	323	294
-315		336		285			282		331			
-320	328	**379**	337	**396**	310	301	**344**	315	**398**	334	318	358
-325	323	356	342	324			334		366	329		356
-330	**338**	361	**364**	338	332	317	342	324	357	**352**	328	**384**
-335	333		364		**355**			324		336	322	345
-340	337	338	350	337	353	332	326	**331**	330	336	**330**	342
-345					350	335		323			323	
-350	336	338	343	337	340	**337**	329	325	329	329	328	333
-355						336						

Eintauchtiefe 9 mm

Temperatur [°C] 22
relative Feuchte [%] 52
äußerer Luftdruck [hPa] 1020

Position [-] / Winkel [°]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	**336**	335	345	**347**	336	331	327	**332**	325	328	329	335
-5	325			332				321			322	
-10	320	319	319	324	329	322	322	320	319	316	322	319
-20	308	310	308	313	313	308	306	302	304	304	305	306
-30	298	297	290	295	295	287	284	284	283	288	290	297
-40	285	289	282	281	278	278	275	274	279	280	285	285
-50	271	266	267	262	261	254	253	255	256	260	265	268
-60	244	235	232	232	231	224	223	214	216	220	229	235
-70	179	175	166	160	160	154	145	122	130	143	159	168
-80	171	171	161	156	172	182	155	144	129	143	155	165
-90	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-100	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-110	91	79	64	53	43	39	42	50	62	74	86	94
-120	114	100	85	72	66	58	62	77	85	97	110	115
-130	146	132	121	108	104	100	100	110	126	136	145	150
-140	173	160	160	143	141	136	135	151	163	172	172	177
-150	196	187	179	174	167	166	160	167	180	195	197	202
-160	210	200	197	186	191	189	186	191	200	204	214	222
-170	219	210	200	199	194	186	190	194	207	216	219	226
-180	226	212	207	200	196	191	193	202	209	214	223	228
-190	246	226	231	218	221	215	216	220	224	235	237	244
-200	248	221	227	219	216	213	219	224	228	232	233	242
-210	242	206	212	213	222	208	212	217	219	226	224	234
-220	212	185	197	201	207	187	193	183	194	210	193	217
-230	201	157	193	187	185	174	174	169	174	192	182	200
-240	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-250	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-260	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-270	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-280	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-290	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-300	250	288	230	211	230	230	232	236	229	242	197	245
-310	284	295	259	230	259	262	255	270	261	275	265	277
-320	314	315	309	276	288	288	291	296	311	309	306	317
-325			338									330
-330	334	332	**351**	332	331	321	317	321	324	334	328	**339**
-335	327	328	350							331	321	334
-340	**336**	**337**	349	334	339	333	326	324	325	**335**	**329**	334
-345	330	336			337	331	324		319	323	**330**	
-350	335	335	339	335	**340**	**336**	**328**	328	**327**	332	327	330
-355	332			337	335	329	325	324	326		324	

Eintauchtiefe 10 mm

Temperatur [°C] 25
relative Feuchte [%] 36
äußerer Luftdruck [hPa] 1021

Position [-] / Winkel [°]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	325	325	336	**342**	332	329	320	326	320	324	327	320
-5				331								
-10	315	314	320	324	325	324	321	318	314	313	311	312
-20	301	300	300	308	306	304	299	300	293	295	299	301
-30	299	297	292	296	294	288	288	288	291	293	293	296
-40	284	284	280	282	280	276	271	274	272	276	281	282
-50	275	271	265	262	262	257	259	260	259	263	263	273
-60	240	238	232	229	232	225	218	222	219	225	228	237
-70	167	165	150	149	172	157	169	140	120	133	148	156
-80	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-90	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-100	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-110	93	77	62	56	43	49	44	53	59	75	86	94
-120	109	95	80	68	63	57	63	71	84	99	107	114
-130	141	127	112	105	94	95	94	107	120	130	141	146
-140	165	154	144	131	130	122	131	136	151	160	168	173
-150	194	185	179	175	163	162	159	175	181	188	197	205
-160	208	199	188	185	177	172	176	190	197	198	208	211
-170	214	202	200	194	189	188	188	196	202	211	216	221
-180	221	208	199	200	195	194	196	205	210	213	219	222
-190	234	218	218	209	206	203	205	212	222	226	231	236
-200	243	214	220	220	212	212	214	219	223	229	230	240
-210	238	202	215	212	209	207	207	213	217	224	222	234
-220	220	183	206	206	208	199	196	205	201	211	206	215
-230	201	158	193	191	184	178	176	182	172	188	185	197
-240	174	112	157	166	150	147	129	146	137	146	150	157
-250	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-260	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-270	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-280	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-290	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-300	235	295	213	204	214	211	226	227	226	230	217	232
-310	280	302	251	233	248	256	255	270	257	274	264	272
-320	316	314	312	279	286	291	284	302	294	304	309	307
-325			280									
-330	331	327	**344**	322	312	310	308	315	316	323	325	326
-335	324		**344**						313	316	319	
-340	**333**	332	343	337	329	323	321	325	**327**	**328**	**329**	330
-345	330	333			326	326	321	318	317	321	321	326
-350	331	**335**	340	334	333	**331**	**324**	**330**	322	324	328	**331**
-355		332		338	**334**	**331**	326	324				327

Eintauchtiefe 11 mm

Temperatur [°C] 23
relative Feuchte [%] 51
äußerer Luftdruck [hPa] 1022

Position [-] / Winkel [°]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	327	326	332	**338**	332	327	324	323	323	323	323	323
-5				336	**334**		**326**					
-10	313	315	320	326	324	321	318	319	314	315	311	313
-20	298	299	297	301	302	300	293	298	295	294	298	298
-30	293	292	290	288	291	281	277	282	284	283	287	291
-40	280	279	274	276	273	271	266	267	272	274	279	279
-50	266	262	256	258	254	252	248	251	256	258	260	263
-60	239	234	226	228	224	218	205	205	214	221	225	233
-70	157	153	170	172	227	217	209	190	155	151	147	151
-80	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-90	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-100	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-110	99	86	72	62	56	52	62	64	74	87	97	102
-120	108	94	76	67	61	60	60	77	91	98	108	114
-130	144	130	116	107	99	93	100	112	123	136	144	146
-140	167	160	144	137	129	131	130	150	154	163	170	174
-150	193	183	171	161	161	162	156	170	179	188	196	200
-160	207	196	190	185	178	176	177	187	196	202	210	213
-170	212	201	196	195	189	190	189	192	205	209	215	221
-180	219	210	201	198	195	194	195	200	207	217	222	225
-190	234	216	216	207	207	204	204	212	220	225	230	233
-200	239	215	218	215	211	210	212	217	219	227	233	238
-210	239	204	212	217	212	211	210	213	218	223	228	230
-220	216	183	200	201	195	194	189	198	199	207	210	215
-230	200	160	186	188	176	173	170	181	182	190	196	201
-240	170	119	150	152	143	143	128	146	146	146	156	160
-250	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-260	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-270	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-280	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-290	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-300	258	300	213	220	240	236	240	245	248	253	241	255
-310	295	313	256	244	266	270	270	283	281	290	287	288
-320	319	323	310	284	284	290	290	297	298	305	313	308
-325		324										
-330	330	333	337	318	307	309	309	317	315	320	326	323
-335		331	342									
-340	331	333	343	330	325	320	319	322	326	327	329	330
-345	330	**334**	**344**			323		318	323	317	323	323
-350	**332**	333	340	334	328	328	323	**331**	**333**	**332**	**331**	**333**
-355	331	333		337	**334**	**329**	**326**	322	322	319	322	324

Eintauchtiefe 12 mm

Temperatur [°C] 23
relative Feuchte [%] 42
äußerer Luftdruck [hPa] 1024

Position [-] / Winkel [°]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	316	316	326	335	327	323	320	322	316	317	318	315
-5					**331**	**325**						
-10	305	307	311	315	320	313	311	314	306	305	302	303
-20	295	292	297	298	301	297	292	294	290	293	294	295
-30	283	285	279	277	279	273	268	276	275	278	283	283
-40	280	277	270	273	267	265	270	271	263	270	273	277
-50	257	256	248	248	246	242	236	244	238	244	253	256
-60	216	213	201	192	193	167	155	169	173	185	201	213
-70	175	167	169	172	211	192	188	159	152	154	159	166
-80	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-90	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-100	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-110	97	84	66	61	51	47	54	57	76	85	97	103
-120	110	97	79	64	60	54	54	74	86	100	109	115
-130	136	123	111	101	87	88	95	97	114	129	139	142
-140	168	157	144	129	131	128	136	146	155	164	170	177
-150	186	179	166	159	153	151	150	164	173	180	189	194
-160	199	190	175	174	167	167	164	174	184	195	202	208
-170	209	197	188	186	173	174	181	185	197	200	207	216
-180	220	206	202	194	182	187	183	197	202	212	216	225
-190	227	210	206	202	196	195	197	205	211	215	223	229
-200	235	209	212	208	204	202	200	211	215	220	226	232
-210	231	194	205	209	200	197	197	205	208	213	221	225
-220	216	182	197	201	184	181	178	194	191	197	205	211
-230	193	190	206	199	177	161	153	166	169	175	186	189
-240	196	165	175	172	154	147	147	153	170	178	189	190
-250	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-260	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-270	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-280	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-290	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-300	247	295	181	215	238	226	236	229	229	238	223	239
-310	274	298	221	236	260	251	247	250	251	269	255	271
-320	324	329	307	286	288	294	289	304	295	303	315	312
-325		333					304				318	
-330	339	**345**	347	329	319	319	**324**	330	327	331	**337**	334
-335	330	334	341	323			310	320	320	320	327	325
-340	**340**	**345**	**355**	**341**	325	322	318	**334**	**331**	**332**	**337**	**338**
-345	330	329	343	331				323	318	323	324	325
-350	329	332	341	332	323	324	317	332	327	328	332	329
-355					328	323						

Eintauchtiefe 13 mm

Temperatur [°C] 20
relative Feuchte [%] 41
äußerer Luftdruck [hPa] 1022

Position [-] / Winkel [°]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	318	316	319	326	319	319	317	330	329	321	313	316
-10	305	304	309	316	320	321	315	320	307	304	308	304
-20	294	294	291	297	294	294	294	299	294	288	290	291
-30	287	285	281	284	273	274	274	276	280	280	281	284
-40	273	273	267	263	260	267	261	265	260	265	274	272
-50	260	259	251	259	250	246	244	249	244	255	256	259
-60	212	208	200	203	181	157	162	166	170	185	201	209
-70	174	170	179	184	222	209	193	170	157	162	166	169
-80	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-90	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-100	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-110	96	83	67	54	50	57	64	63	69	83	94	102
-120	106	95	78	63	55	62	71	74	82	97	109	113
-130	135	122	103	102	93	88	91	103	115	124	136	140
-140	163	151	139	130	122	116	121	136	149	156	165	170
-150	184	170	162	155	149	147	150	158	169	176	185	190
-160	198	187	177	172	168	166	169	179	184	195	201	205
-170	206	194	186	185	179	176	169	181	194	198	205	210
-180	211	199	193	183	180	173	174	186	195	207	210	216
-190	217	199	193	194	190	188	190	197	202	206	213	218
-200	227	208	212	211	205	197	195	210	209	209	218	226
-210	227	212	211	217	206	200	194	209	212	215	221	226
-220	199	193	189	188	179	167	172	168	182	200	210	217
-230	234	216	213	162	201	196	196	202	211	217	227	232
-240	144	136	135	133	135	127	120	126	122	150	158	160
-250	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-260	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-270	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-280	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-290	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-300	271	306	238	239	252	271	274	248	250	261	254	268
-310	315	315	269	252	290	308	314	291	286	300	300	305
-320	337	334	328	291	309	317	325	308	314	317	328	327
-325			321									
-330	350	348	**359**	329	317	316	317	324	325	329	343	343
-335	342	345	**359**	326						323	334	333
-340	**352**	**352**	354	344	329	327	326	337	343	**344**	**349**	**347**
-345	342	346		**348**	335	330	331	334	332	333	335	342
-350	339	339	349	343	**341**	**339**	**334**	**339**	**345**	340	344	341
-355					332	327	325	327	333			

Eintauchtiefe 14 mm

Temperatur [°C] 22
relative Feuchte [%] 36
äußerer Luftdruck [hPa] 1023

Position [-] / Winkel [°]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	333	326	322	336	325	321	319	326	329	333	**334**	334
-5	326	318	322	328	327	320	315	319	324	324	325	322
-10	301	299	294	305	310	311	307	314	313	315	306	306
-20	292	292	283	286	285	284	286	291	292	286	291	292
-30	283	278	274	271	271	272	271	274	279	281	277	279
-40	273	269	262	262	259	254	255	261	265	265	271	271
-50	259	258	245	247	247	242	238	244	250	254	254	257
-60	214	209	198	197	197	184	181	195	184	194	205	211
-70	169	172	168	176	213	195	196	188	164	158	162	163
-80	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-90	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-100	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-110	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-120	105	93	73	63	70	66	69	67	82	96	106	111
-130	129	114	98	87	84	81	82	98	115	123	130	134
-140	162	148	136	128	120	122	122	134	139	155	164	168
-150	180	167	155	152	149	142	148	155	164	173	180	185
-160	193	184	168	167	160	154	159	169	179	191	196	200
-170	200	190	184	177	170	169	169	178	188	195	201	206
-180	208	196	187	180	172	167	173	184	192	201	208	215
-190	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-200	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-210	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-220	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-230	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-240	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-250	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-260	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-270	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-280	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-290	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-300	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-310	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-320	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-330	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-340	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-350	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-355	**338**	**333**	**335**	**342**	**333**	**326**	**326**	**330**	**332**	**334**	332	**336**

Eintauchtiefe 15 mm

Temperatur [°C] 23
relative Feuchte [%] 44
äußerer Luftdruck [hPa] 1022

Position [-] / Winkel [°]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	332	329	334	**340**	**332**	**324**	**321**	**330**	**333**	**332**	**330**	334
-5	320	320	320	322	323	318	316	317	319	322	322	322
-10	311	309	303	310	309	307	304	311	310	311	312	312
-20	292	291	285	285	289	289	290	289	294	297	296	295
-30	290	285	281	280	274	277	276	283	288	284	286	286
-40	280	276	270	272	266	266	264	270	271	272	276	278
-50	263	261	253	252	247	245	238	252	252	249	257	260
-60	225	221	209	211	224	217	212	221	206	210	214	222
-70	173	184	186	185	229	226	218	226	179	166	159	159
-80	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-90	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-100	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-110	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-120	113	101	86	78	68	70	73	75	90	104	111	117
-130	130	114	99	88	82	79	80	98	110	120	129	135
-140	166	153	137	131	130	126	124	140	149	159	166	171
-150	184	173	162	154	150	143	144	158	165	176	184	190
-160	195	182	176	167	162	157	160	170	179	190	197	202
-170	200	187	180	176	167	161	163	170	181	191	199	208
-180	200	193	184	176	170	159	161	173	184	191	203	209
-190	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-200	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-210	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-220	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-230	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-240	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-250	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-260	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-270	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
-280	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-290	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-300	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-310	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-320	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-330	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-340	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-350	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-350	323	316	323	335	299	295	292	306	319	324	325	322
-355	**335**	**337**	**339**	338	328	319	318	324	325	331	329	**336**

9.8.8 Radius 35,5 mm

Eintauchtiefe 3 mm

Temperatur [°C] 18
relative Feuchte [%] 61
äußerer Luftdruck [hPa] 1016

Position [-] / Winkel [°]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	440	447	442	417	429	427	427	443	435	445	441	436
-10	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p
-20	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p
-30	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p
-40	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p
-50	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p
-60	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p
-70	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p
-80	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p
-90	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p
-100	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p
-110	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p
-120	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p
-130	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p
-140	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p
-150	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p
-160	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p
-170	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p
-180	312	275	293	289	288	290	289	286	288	290	294	294
-190	334	295	305	302	300	300	300	306	301	300	305	305
-200	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-210	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-220	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-230	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-240	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-250	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-260	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-270	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-280	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-290	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-300	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-310	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-320	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-330	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-340	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-350	440	442	377	395	411	420	412	416	415	424	437	434

Eintauchtiefe 4 mm

Temperatur [°C] 19
relative Feuchte [%] 54
äußerer Luftdruck [hPa] 1015

Position [-] / Winkel [°]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	436	437	**430**	400	423	**421**	**417**	**437**	**431**	**444**	**438**	425
-5			423	424	**430**	411	404	423	412	406	401	
-10	396	400	423	**432**	422	411	403	418	410	406	405	395
-15				425								
-20	370	373	390	419	387	383	377	373	374	376	374	375
-30	360	361	368	380	364	360	359	356	355	358	363	361
-40	343	343	345	362	346	344	336	335	331	333	339	344
-50	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p
-60	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p
-70	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p
-80	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p
-90	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p
-100	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p
-110	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p
-120	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p
-130	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p
-140	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p
-150	272	255	254	260	255	253	248	246	250	254	259	265
-160	292	276	279	267	275	275	271	265	269	279	278	285
-170	296	272	280	285	275	274	271	274	276	283	285	288
-180	307	279	289	285	276	273	273	278	270	274	284	286
-190	331	296	302	307	280	285	287	284	286	287	294	298
-200	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-210	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-220	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-230	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-240	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-250	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-260	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-270	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-280	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-290	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-300	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-310	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-320	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-330	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-340	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-350	**440**	**439**	368	388	412	415	413	418	420	428	**438**	**436**
-355	432	427	373		407	414	412	421	413	424	435	423

Eintauchtiefe 5 mm

Temperatur [°C] 19
relative Feuchte [%] 53
äußerer Luftdruck [hPa] 1014

Position [-] / Winkel [°]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	**452**	**458**	429	398	417	**425**	463	**440**	430	456	**442**	455
-5	442	431	**461**	406	424	417	**479**	439	426	**467**	436	**469**
-10	412	410	454	**431**	**433**	415	419	437	415	419	414	405
-15			421	420	**433**							
-20	393	390	414	411	429	408	401	409	397	396	393	391
-30	366	364	372	374	329	329	325	367	369	368	368	366
-40	347	348	350	360	353	350	348	347	347	347	348	348
-50	320	319	315	338	320	317	317	316	319	323	323	326
-60	285	278	272	295	275	271	268	267	270	277	281	285
-70	246	239	228	232	236	233	235	232	235	237	241	245
-80	188	179	166	209	179	176	167	155	142	152	163	181
-90	161	151	136	140	127	125	127	140	144	152	154	157
-100	184	173	159	171	150	150	151	154	162	169	177	183
-110	195	176	167	189	163	166	167	175	183	188	191	194
-120	217	205	202	211	187	184	186	196	203	208	211	215
-130	230	211	209	211	203	201	198	216	222	227	229	235
-140	250	231	233	238	227	228	232	235	238	245	248	248
-150	265	248	246	260	246	243	246	245	251	255	259	264
-160	284	263	267	274	263	263	261	268	273	278	280	281
-170	294	268	267	269	272	263	264	270	278	285	286	289
-180	301	278	265	283	275	268	270	277	279	283	287	288
-190	325	289	290	304	267	281	280	284	288	286	293	293
-200	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-210	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-220	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-230	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-240	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-250	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-260	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-270	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-280	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-290	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-300	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-310	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-320	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-330	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-340	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-350	431	433	348	387	403	411	405	407	412	419	433	433
-355	438	452				415	427	421	**446**	435	434	440

Eintauchtiefe 6 mm

Temperatur [°C] 20
relative Feuchte [%] 62
äußerer Luftdruck [hPa] 1017

Position [-] / Winkel [°]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	447	505	393	427	409	414	440	426	495	**448**	**437**	454
-5	**451**	**528**	437	**898**	415	**415**	447	431	**532**	447	435	**475**
-10	417	401	**458**	579	428	408	**460**	**433**	412	440	411	424
-15			454		**430**		430	427				
-20	381	377	398	414	413	390	382	389	383	383	385	379
-30	360	360	364	378	381	372	369	356	356	358	360	360
-40	343	344	347	353	347	347	344	338	340	343	344	343
-50	317	314	312	323	317	316	314	310	310	314	314	317
-60	282	280	273	285	278	277	278	272	273	276	279	280
-70	244	239	234	244	233	226	223	227	227	233	237	242
-80	184	172	160	187	159	170	164	155	163	173	180	184
-90	161	149	134	151	117	117	124	135	145	151	1557	159
-100	185	179	165	173	151	159	163	158	167	174	181	182
-110	199	186	186	189	173	173	176	183	188	193	197	200
-120	214	200	196	204	200	195	191	198	206	212	215	216
-130	232	222	223	220	202	201	207	214	220	226	228	230
-140	245	230	226	240	239	239	239	240	239	240	249	250
-150	272	261	262	256	253	252	259	257	259	261	269	272
-160	283	264	272	269	273	275	272	275	276	280	280	280
-170	292	269	270	278	284	281	282	280	280	274	274	284
-180	299	280	284	281	281	274	276	271	279	262	285	289
-190	329	295	297	296	254	277	287	284	288	284	299	299
-200	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-210	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-220	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-230	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-240	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-250	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-260	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-270	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-280	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-290	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-300	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-310	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-320	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-330	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-340	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-350	428	438	337	390	409	412	409	407	413	421	428	429
-355	430	457		387		408			445	428	428	427

Eintauchtiefe 7 mm

Temperatur [°C] 20
relative Feuchte [%] 61
äußerer Luftdruck [hPa] 1021

Position [-] / Winkel [°]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	**450**	511	393	467	414	**417**	442	426	520	445	**437**	454
-5	447	**541**	437	**750**		413	509	433	**610**	453	424	472
-10	439	468	**468**	462	425	416	**516**	**442**	491	**461**	425	**491**
-15			436		422		408	405		419		427
-20	387	380	411	394	**428**	399	392	401	381	386	378	384
-25					383							
-30	358	362	365	369	370	368	363	360	358	358	358	358
-40	335	339	339	356	350	347	344	342	340	339	338	339
-50	319	319	318	330	313	310	306	306	313	311	316	321
-60	289	286	282	278	291	288	288	285	285	285	286	289
-70	238	229	226	234	225	211	214	217	220	227	232	234
-80	185	174	166	174	169	165	159	157	157	157	174	182
-90	163	154	138	135	138	133	132	129	133	143	150	156
-100	186	180	166	171	163	160	158	159	171	176	184	185
-110	203	193	185	176	179	172	173	177	185	190	199	202
-120	217	207	206	203	204	201	202	202	204	206	210	215
-130	235	215	211	213	206	199	205	213	216	229	231	231
-140	254	241	243	235	240	241	241	242	246	248	250	253
-150	272	255	256	255	250	247	250	250	251	260	264	267
-160	286	265	264	242	261	269	274	278	278	282	281	282
-170	277	269	257	275	280	263	274	264	277	273	277	287
-180	292	271	273	280	283	276	282	264	278	209	281	286
-190	327	295	293	293	211	286	287	287	288	272	294	296
-200	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-210	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-220	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-230	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-240	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-250	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-260	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-270	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-280	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-290	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-300	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-310	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-320	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-330	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-340	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-350	428	442	342	390	417	**417**	414	400	422	422	428	424
-355	430	439		410		406			432		424	

Eintauchtiefe 8 mm

Temperatur [°C] 21
relative Feuchte [%] 64
äußerer Luftdruck [hPa] 1017

Position [-] / Winkel [°]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	**442**	493	417	411	407	**409**	451	428	**538**	441	**423**	457
-5	441	**514**	461	410		407	**513**	**436**	487	446	418	**486**
-10	425	459	**465**	**422**	418	407	511	427	452	443	412	483
-15			450	413	414		507			**450**		484
-20	379	368	401	404	**420**	395	389	386	371	382	372	390
-25					374							
-30	359	362	367	365	372	361	357	357	354	352	354	357
-40	339	335	344	348	347	341	338	345	340	335	337	335
-50	316	314	314	320	318	319	319	316	315	318	317	315
-60	283	278	274	283	278	276	272	277	274	275	277	281
-70	232	225	217	236	215	209	207	209	215	222	227	230
-80	191	182	175	176	183	177	174	172	174	176	181	186
-90	161	150	127	143	140	135	136	129	139	145	157	159
-100	185	178	159	170	153	154	153	166	172	178	185	187
-110	204	193	186	182	173	174	176	182	190	196	200	202
-120	219	207	200	205	202	197	199	195	205	211	216	218
-130	231	215	221	219	208	193	213	208	217	224	229	231
-140	259	244	242	234	240	240	242	238	248	252	254	256
-150	271	254	256	253	251	249	250	253	259	262	264	267
-160	281	264	247	269	261	259	259	269	273	277	274	279
-170	278	270	262	278	285	266	279	258	274	205	169	289
-180	296	283	279	286	289	272	277	268	279	244	280	288
-190	324	291	293	290	192	291	290	290	292	270	291	295
-200	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-210	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-220	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-230	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-240	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-250	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-260	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-270	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-280	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-290	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-300	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-310	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-320	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-330	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-340	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-350	427	431	357	402	414	**409**	408	419	424	423	418	425
-355	432	438				406		418	428		416	

Eintauchtiefe 9 mm

Temperatur [°C] 22
relative Feuchte [%] 61
äußerer Luftdruck [hPa] 1013

Position [-] / Winkel [°]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	**435**	**481**	415	408	405	400	410	419	**508**	**433**	**419**	440
-5	428	413	448	417	412	400	412	416	400	424	406	**456**
-10	414	400	**452**	**421**	**415**	**402**	**471**	**432**	422	430	407	**449**
-15			407	398	403	395	388	393				389
-20	380	373	396	380	412	399	391	389	372	380	376	382
-30	342	344	348	356	367	362	363	359	354	356	339	341
-40	339	337	339	344	324	328	332	336	338	333	335	335
-50	315	313	313	327	321	323	322	321	316	314	313	320
-60	280	278	273	296	277	278	272	275	278	279	274	277
-70	232	226	218	228	221	215	217	213	214	217	224	230
-80	174	169	161	172	162	163	154	148	156	162	168	176
-90	161	145	134	122	129	122	120	129	136	144	149	155
-100	187	168	152	167	159	153	156	172	177	180	185	183
-110	205	184	178	185	170	169	170	186	192	196	200	202
-120	209	203	193	195	193	196	194	196	209	209	207	218
-130	231	220	215	204	211	214	212	223	225	228	231	232
-140	249	229	234	229	226	229	225	236	239	244	243	249
-150	272	256	259	250	249	255	250	259	261	264	267	263
-160	276	247	229	265	260	258	260	268	266	266	274	276
-170	264	265	259	275	277	255	271	252	259	188	266	275
-180	291	265	276	280	256	262	260	237	267	212	262	286
-190	317	276	283	289	260	270	268	280	263	262	282	282
-200	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-210	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-220	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-230	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-240	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-250	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-260	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-270	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-280	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-290	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-300	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-310	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-320	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-330	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-340	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-350	430	426	369	400	408	395	380	411	418	419	417	422
-355	425	415							403	413	410	

Eintauchtiefe 10 mm

Temperatur [°C] 23
relative Feuchte [%] 59
äußerer Luftdruck [hPa] 1010

Position [-] / Winkel [°]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	**431**	**425**	398	412	**411**	**400**	**399**	**413**	**413**	**418**	**416**	**418**
-5	420	403	429	409	397	394	393	406	397	406	404	414
-10	407	394	**433**	**418**	405	397	398	412	396	400	396	410
-15			407	402								
-20	378	374	402	385	395	391	387	388	378	377	375	378
-30	353	347	355	364	360	365	359	360	351	352	349	351
-40	338	334	337	346	343	345	343	346	339	340	336	337
-50	318	312	311	315	316	318	314	317	314	315	314	315
-60	278	271	266	265	267	270	271	270	269	272	273	275
-70	232	224	216	218	221	216	215	216	217	223	227	229
-80	196	184	175	176	174	172	166	165	173	181	186	191
-90	162	147	128	132	124	124	118	123	130	136	150	156
-100	184	171	160	158	146	147	148	152	158	168	175	179
-110	199	184	179	179	168	169	165	171	178	185	191	193
-120	213	199	196	184	186	184	185	188	195	201	206	211
-130	233	217	216	205	208	208	206	211	217	221	228	231
-140	249	233	234	224	220	222	224	230	238	242	244	246
-150	271	251	254	250	247	249	245	250	254	259	261	266
-160	280	262	259	262	263	261	265	265	270	274	272	280
-170	284	262	267	276	272	264	275	265	273	271	272	282
-180	297	268	278	282	274	267	273	272	272	272	275	282
-190	323	277	284	285	268	277	279	285	281	279	282	284
-200	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-210	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-220	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-230	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-240	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-250	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-260	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-270	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-280	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-290	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-300	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-310	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-320	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-330	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-340	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-350	421	420	367	388	406	394	395	404	406	410	410	411
-355	421	416			397	394	389	397	397	402	401	403

Eintauchtiefe 11 mm

Temperatur [°C] 23
relative Feuchte [%] 60
äußerer Luftdruck [hPa] 1016

Position [-] / Winkel [°]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	**421**	418	417	404	**409**	388	**397**	**405**	**408**	**405**	**407**	**410**
-5	403		415	408	394	387	385	395	390	387	388	387
-10	410	399	**431**	**415**	406	**393**	393	**405**	400	398	399	399
-15			395	391		368		377				
-20	364	362	378	402	376	377	375	376	368	365	362	362
-30	355	349	358	367	360	362	364	363	358	356	353	355
-40	339	331	334	343	341	336	340	341	338	338	334	336
-50	309	300	298	313	306	304	307	309	306	308	305	306
-60	272	263	261	274	262	261	261	263	262	268	267	270
-70	235	224	219	220	219	218	216	216	218	225	228	232
-80	204	186	180	168	176	175	177	178	184	193	198	202
-90	158	143	125	138	118	122	126	127	129	142	154	157
-100	185	170	160	157	148	146	149	153	158	168	176	180
-110	197	181	171	176	165	164	169	174	180	185	192	196
-120	213	198	195	195	182	182	185	189	197	202	208	211
-130	226	210	208	212	201	203	205	208	213	219	224	227
-140	251	235	237	232	230	229	228	230	235	238	247	248
-150	265	249	249	249	242	243	242	247	248	256	260	262
-160	275	258	260	266	261	260	260	265	264	273	269	275
-170	287	261	270	277	264	267	267	269	272	278	275	280
-180	300	262	268	281	271	273	273	274	276	277	278	276
-190	319	280	283	286	271	274	271	277	278	278	281	283
-200	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-210	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-220	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-230	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-240	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-250	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-260	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-270	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-280	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-290	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-300	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-310	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-320	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-330	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-340	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
-350	419	**419**	375	388	401	387	385	399	401	403	404	409
-355	414	412			391		386	395	395	393	395	400

9.9 Rohdaten zur Berechnung der Strömungsgeschwindigkeiten in den einzelnen Ebenen der Spiralstrahlmühle

9.9.1 Stirnfläche der Mahlkammer

	Position	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
ETT	tats. Radius [mm]	40,0	40,0	38,3	36,0	37,3	38,3	38,3	38,3	38,3	38,3	39,0	40,0
4	abs. ETT [mm]	7,5	7,5	7,2	6,8	7,1	7,2	7,2	7,2	7,2	7,2	7,3	7,5
Radius	Auswertungsebene	(+2)	(+2)	(+3)	(+3)	(+3)	(+3)	(+3)	(+3)	(+3)	(+3)	(+3)	(+2)
35,5	Anströmwinkel [°]	-350	-350	0	-10	-5	0	0	0	0	0	-350	-350
	abs. Richtung [°]	115	145	165	185	220	255	285	315	345	15	55	85
	stat. Druck [hPa]	377,1	377,1	360,4	337,0	350,4	360,4	360,4	360,4	360,4	360,4	367,1	377,1
	Gesamtdruck [hPa]	440	439	430	432	430	421	417	437	431	444	438	436
	Geschwindigkeit [m/s]	88	87	93	109	100	86	84	97	93	101	93	85
	Temp. [°C]	24,0	21,5	21,5	21,5	24,0	21,0	21,0	21,0	21,0	21,0	21,5	21,5
ETT	tats. Radius [mm]	29,3	33,3	34,3	29,3	29,3	29,3	31,7	29,3	31,7	31,7	29,3	29,3
3	abs. ETT [mm]	4,9	5,4	5,6	4,9	4,9	4,9	5,2	4,9	5,2	5,2	4,9	4,9
Radius	Auswertungsebene	(+5)	(+5)	(+4)	(+5)	(+5)	(+5)	(+5)	(+5)	(+5)	(+5)	(+5)	(+5)
26,5	Anströmwinkel [°]	0	-340	-335	0	0	0	-350	0	-350	-350	0	0
	abs. Richtung [°]	105	155	190	195	225	255	295	315	355	25	45	75
	stat. Druck [hPa]	270,2	310,3	320,3	270,2	270,2	270,2	293,6	270,2	293,6	293,6	270,2	270,2
	Gesamtdruck [hPa]	351	353	367	354	349	346	343	344	350	352	344	350
	Geschwindigkeit [m/s]	103	74	77	105	102	100	81	99	86	88	99	103
	Temp. [°C]	23,0	22,0	22,5	22,5	23,0	23,0	24,5	23,0	24,5	24,5	23,0	23,5
ETT	tats. Radius [mm]	35,3	29,3	29,3	33,3	33,3	33,3	29,3	36,3	29,3	29,3	35,3	35,3
3	abs. ETT [mm]	5,7	4,9	4,9	5,4	5,4	5,4	4,9	5,9	4,9	4,9	5,7	5,7
Radius	Auswertungsebene	(+4)	(+5)	(+5)	(+5)	(+5)	(+5)	(+5)	(+4)	(+5)	(+5)	(+4)	(+4)
26,5	Anströmwinkel [°]	-330	0	0	-340	-340	-340	0	-320	0	0	-330	-330
	abs. Richtung [°]	135	135	165	215	245	275	285	355	345	15	75	105
B	stat. Druck [hPa]	330,3	270,2	270,2	310,3	310,3	310,3	270,2	340,4	270,2	270,2	330,3	330,3
	Gesamtdruck [hPa]	338	351	356	345	347	343	342	328	344	350	333	332
	Geschwindigkeit [m/s]	31	103	106	67	69	65	98	-	99	103	19	15
	Temp. [°C]	23,0	22,0	22,5	22,5	23,0	23,0	24,5	23,0	24,5	24,5	23,0	23,5
ETT	tats. Radius [mm]	21,0	21,0	21,3	21,7	21,0	21,0	21,0	22,3	22,3	22,3	22,3	21,3
3	abs. ETT [mm]	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,1	4,1	4,1	4,1	4,0
Radius	Auswertungsebene	(+6)	(+6)	(+6)	(+6)	(+6)	(+6)	(+6)	(+6)	(+6)	(+6)	(+6)	(+6)
17	Anströmwinkel [°]	-5	-5	-5	0	-5	-5	-5	-355	-355	-355	-355	-5
	abs. Richtung [°]	100	130	160	195	220	250	280	320	350	20	50	70
	stat. Druck [hPa]	186,7	186,7	190,0	193,3	186,7	186,7	186,7	200,0	200,0	200,0	200,0	190,0
	Gesamtdruck [hPa]	291	292	286	282	267	258	253	252	258	268	277	286
	Geschwindigkeit [m/s]	121	122	116	112	107	101	97	86	91	98	104	116
	Temp. [°C]	25,0	25,0	25,0	26,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0

Die absolute Eintauchtiefe wird mit abs. ETT abgekürzt. Die Angaben von Eintauchtiefe und Radius erfolgen in mm.

ETT	tats. Radius [mm]	19,3	18,0	16,0	16,0	16,0	16,0	20,7	19,3	21,3	21,0	20,7	19,3
3	abs. ETT [mm]	3,8	3,7	3,6	3,6	3,6	3,6	3,9	3,8	4,0	4,0	3,9	3,8
Radius	Auswertungsebene	(+6)	(+6)	(+6)	(+6)	(+6)	(+6)	(+6)	(+6)	(+6)	(+6)	(+6)	(+6)
13	Anströmwinkel [°]	-355	-5	-15	-15	-15	-15	-345	-350	-340	-345	-345	-355
	abs. Richtung [°]	110	130	150	180	210	240	300	325	5	30	60	80
	stat. Druck [hPa]	169,9	156,6	136,5	136,5	136,5	136,5	183,3	169,9	190,0	186,7	183,3	169,9
	Gesamtdruck [hPa]	274	277	274	268	256	230	226	223	231	243	258	269
	Geschwindigkeit [m/s]	122	131	141	138	132	117	78	87	76	90	103	119
	Temp. [°C]	24,0	24,0	23,5	23,5	23,5	23,5	24,0	23,0	23,0	23,5	23,5	24,0
ETT	tats. Radius [mm]	18,7	18,3	15,0	15,3	15,3	13,7	13,7	14,3	19,7	20,7	19,7	18,7
3	abs. ETT [mm]	3,8	3,7	3,5	3,5	3,5	3,4	3,4	3,4	3,8	3,9	3,8	3,8
Radius	Auswertungsebene	(+6)	(+6)	(+7)	(+6)	(+6)	(+7)	(+7)	(+7)	(+6)	(+6)	(+6)	(+6)
11	Anströmwinkel [°]	-350	-355	-5	-15	-15	-20	-20	-10	-340	-335	-340	-350
	abs. Richtung [°]	115	140	160	180	210	235	265	305	5	40	65	85
	stat. Druck [hPa]	163,3	159,9	126,5	129,8	129,8	113,1	113,1	119,8	173,3	183,3	173,3	163,3
	Gesamtdruck [hPa]	251	255	255	246	229	211	196	183	178	196	220	239
	Geschwindigkeit [m/s]	112	117	137	130	121	121	111	97	26	43	82	104
	Temp. [°C]	23,0	23,0	23,0	23,0	23,0	22,0	22,0	22,0	23,0	23,0	23,0	23,0
ETT	tats. Radius [mm]	16,7	15,7	15,7	14,7	14,7	14,7	14,7	18,7	19,7	18,7	18,7	18,0
3	abs. ETT [mm]	3,6	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,8	3,8	3,8	3,8	3,7
Radius	Auswertungsebene	(+6)	(+6)	(+6)	(+7)	(+7)	(+7)	(+7)	(+6)	(+6)	(+6)	(+6)	(+6)
9	Anströmwinkel [°]	-355	-5	-5	-10	-10	-10	-10	-340	-330	-340	-340	-345
	abs. Richtung [°]	110	130	160	185	215	245	275	335	15	35	65	90
	stat. Druck [hPa]	143,2	133,2	133,2	123,2	123,2	123,2	123,2	163,3	173,3	163,3	163,3	156,6
	Gesamtdruck [hPa]	251	259	253	248	226	199	179	180	184	199	224	243
	Geschwindigkeit [m/s]	125	135	132	134	122	105	91	49	39	72	94	112
	Temp. [°C]	22,5	22,5	22,5	17,5	18,0	18,0	18,0	22,0	21,5	22,0	22,0	22,5
ETT	tats. Radius [mm]	15,0	14,3	14,3	13,3	13,3	12,3	12,7	12,7	13,3	17,0	16,0	16,3
4	abs. ETT [mm]	4,5	4,4	4,4	4,4	4,4	4,3	4,3	4,3	4,4	4,6	4,6	4,6
Radius	Auswertungsebene	(+6)	(+6)	(+6)	(+6)	(+6)	(+6)	(+6)	(+6)	(+6)	(+5)	(+5)	(+5)
4	Anströmwinkel [°]	-340	-355	-355	-5	-5	-20	-10	-10	-5	-290	-320	-330
	abs. Richtung [°]	125	140	170	190	220	235	275	305	340	85	85	105
	stat. Druck [hPa]	126,5	119,8	119,8	109,8	109,8	83,8	94,4	94,4	109,8	146,6	136,5	139,9
	Gesamtdruck [hPa]	126	133	128	112	75	31	9	-2	13	45	87	114
	Geschwindigkeit [m/s]	-	45	35	18	-	-	-	-	-	-	-	-
	Temp. [°C]	23,0	23,5	23,5	23,5	23,5	23,5	23,5	23,5	23,0	23,0	23,0	23,0
ETT	tats. Radius [mm]	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0
4	abs. ETT [mm]	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4
Radius	Auswertungsebene	(+6)	(+6)	(+6)	(+6)	(+6)	(+6)	(+6)	(+6)	(+6)	(+6)	(+6)	(+6)
0	Anströmwinkel [°]	-345	-340	-350	-350	-340	-205	-185	-195	-120	-195	-195	-20
	abs. Richtung [°]	120	155	175	205	245	50	100	120	225	180	210	55
	stat. Druck [hPa]	104,7	104,7	104,7	104,7	104,7	104,7	104,7	104,7	104,7	104,7	104,7	104,7
	Gesamtdruck [hPa]	7	17	41	36	39	-1	5	3	2	16	35	2
	Geschwindigkeit [m/s]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Temp. [°C]	23,5	23,0	23,0	23,0	23,0	24,0	24,0	23,0	24,0	24,0	24,0	23,0

9.9.2 Ebene (+6)

	Position	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
ETT	tats. Radius [mm]	21,0	21,0	21,3	21,7	21,0	21,0	21,0	22,3	22,3	22,3	22,3	21,3
3	abs. ETT [mm]	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,1	4,1	4,1	4,1	4,0
Radius	Auswertungsebene	(+6)	(+6)	(+6)	(+6)	(+6)	(+6)	(+6)	(+6)	(+6)	(+6)	(+6)	(+6)
17	Anströmwinkel [°]	-5	-5	-5	0	-5	-5	-5	-355	-355	-355	-355	-5
	abs. Richtung [°]	100	130	160	195	220	250	280	320	350	20	50	70
	stat. Druck [hPa]	186,7	186,7	190,0	193,3	186,7	186,7	186,7	200,0	200,0	200,0	200,0	190,0
	Gesamtdruck [hPa]	291	292	286	282	267	258	253	252	258	268	277	286
	Geschwindigkeit [m/s]	121	122	116	112	107	101	97	86	91	98	104	116
	Temp. [°C]	25,0	25,0	25,0	26,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0
ETT	tats. Radius [mm]	19,3	18,0	16,0	16,0	16,0	16,0	20,7	19,3	21,3	21,0	20,7	19,3
3	abs. ETT [mm]	3,8	3,7	3,6	3,6	3,6	3,6	3,9	3,8	4,0	4,0	3,9	3,8
Radius	Auswertungsebene	(+6)	(+6)	(+6)	(+6)	(+6)	(+6)	(+6)	(+6)	(+6)	(+6)	(+6)	(+6)
13	Anströmwinkel [°]	-355	-5	-15	-15	-15	-15	-345	-350	-340	-345	-345	-355
	abs. Richtung [°]	110	130	150	180	210	240	300	325	5	30	60	80
	stat. Druck [hPa]	169,9	156,6	136,5	136,5	136,5	136,5	183,3	169,9	190,0	186,7	183,3	169,9
	Gesamtdruck [hPa]	274	277	274	268	256	230	226	223	231	243	258	269
	Geschwindigkeit [m/s]	122	131	141	138	132	117	78	87	76	90	103	119
	Temp. [°C]	24,0	24,0	23,5	23,5	23,5	23,5	24,0	23,0	23,0	23,5	23,5	24,0
ETT	tats. Radius [mm]	18,3	18,3	15,0	15,3	15,3	14,3	18,7	19,3	21,0	19,7	19,7	21,0
4	abs. ETT [mm]	4,7	4,7	4,5	4,5	4,5	4,4	4,8	4,8	5,0	4,8	4,8	5,0
Radius	Auswertungsebene	(+5)	(+5)	(+6)	(+5)	(+5)	(+6)	(+5)	(+5)	(+5)	(+5)	(+5)	(+5)
11	Anströmwinkel [°]	-355	-355	-5	-15	-15	-10	-350	-345	-335	-340	-340	-335
	abs. Richtung [°]	110	140	160	180	210	245	295	330	10	35	65	100
	stat. Druck [hPa]	159,9	159,9	126,5	129,8	129,8	119,8	163,3	169,9	186,7	173,3	173,3	186,7
	Gesamtdruck [hPa]	253	255	255	254	230	213	188	176	188	212	226	243
	Geschwindigkeit [m/s]	116	117	137	135	121	118	60	30	14	75	87	90
	Temp. [°C]	23,5	23,5	23,5	23,5	22,5	22,5	23,0	23,5	23,5	22,5	22,5	23,5
ETT	tats. Radius [mm]	18,7	18,3	15,0	15,3	15,3	13,7	13,7	14,3	19,7	20,7	19,7	18,7
3	abs. ETT [mm]	3,8	3,7	3,5	3,5	3,5	3,4	3,4	3,4	3,8	3,9	3,8	3,8
Radius	Auswertungsebene	(+6)	(+6)	(+7)	(+6)	(+6)	(+7)	(+7)	(+7)	(+6)	(+6)	(+6)	(+6)
11	Anströmwinkel [°]	-350	-355	-5	-15	-15	-20	-20	-10	-340	-335	-340	-350
	abs. Richtung [°]	115	140	160	180	210	235	265	305	5	40	65	85
	stat. Druck [hPa]	163,3	159,9	126,5	129,8	129,8	113,1	113,1	119,8	173,3	183,3	173,3	163,3
	Gesamtdruck [hPa]	251	255	255	246	229	211	196	183	178	196	220	239
	Geschwindigkeit [m/s]	112	117	137	130	121	121	111	97	26	43	82	104
	Temp. [°C]	23,0	23,0	23,0	23,0	23,0	22,0	22,0	22,0	23,0	23,0	23,0	23,0
ETT	tats. Radius [mm]	16,7	16,0	15,7	13,7	13,7	13,0	13,0	19,0	19,0	19,0	19,0	18,0
4	abs. ETT [mm]	4,6	4,6	4,5	4,4	4,4	4,4	4,4	4,8	4,8	4,8	4,8	4,7
Radius	Auswertungsebene	(+5)	(+5)	(+5)	(+6)	(+6)	(+6)	(+6)	(+5)	(+5)	(+5)	(+5)	(+5)
9	Anströmwinkel [°]	-355	0	-5	-15	-15	-20	-20	-335	-335	-335	-335	-345
	abs. Richtung [°]	110	135	160	180	210	235	265	340	10	40	70	90
	stat. Druck [hPa]	143,2	136,5	133,2	113,1	113,1	104,7	104,7	166,6	166,6	166,6	166,6	156,6
	Gesamtdruck [hPa]	249	254	252	249	237	211	183	175	186	207	222	237
	Geschwindigkeit [m/s]	124	131	131	141	135	126	109	35	53	76	89	108
	Temp. [°C]	22,0	22,5	22,0	22,0	22,0	22,5	22,5	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0

ETT	tats. Radius [mm]	16,7	15,7	15,7	14,7	14,7	14,7	14,7	18,7	19,7	18,7	18,7	18,0
3	abs. ETT [mm]	3,6	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,8	3,8	3,8	3,8	3,7
Radius	Auswertungsebene	(+6)	(+6)	(+6)	(+7)	(+7)	(+7)	(+7)	(+6)	(+6)	(+6)	(+6)	(+6)
9	Anströmwinkel [°]	-355	-5	-5	-10	-10	-10	-10	-340	-330	-340	-340	-345
	abs. Richtung [°]	110	130	160	185	215	245	275	335	15	35	65	90
	stat. Druck [hPa]	143,2	133,2	133,2	123,2	123,2	123,2	123,2	163,3	173,3	163,3	163,3	156,6
	Gesamtdruck [hPa]	251	259	253	248	226	199	179	180	184	199	224	243
	Geschwindigkeit [m/s]	125	135	132	134	122	105	91	49	39	72	94	112
	Temp. [°C]	22,5	22,5	22,5	17,5	18,0	18,0	18,0	22,0	21,5	22,0	22,0	22,5
ETT	tats. Radius [mm]	15,0	14,3	14,3	13,3	13,3	12,3	12,7	12,7	13,3	17,0	16,0	16,3
4	abs. ETT [mm]	4,5	4,4	4,4	4,4	4,4	4,3	4,3	4,3	4,4	4,6	4,6	4,6
Radius	Auswertungsebene	(+6)	(+6)	(+6)	(+6)	(+6)	(+6)	(+6)	(+6)	(+6)	(+5)	(+5)	(+5)
4	Anströmwinkel [°]	-340	-355	-355	-5	-5	-20	-10	-10	-5	-290	-320	-330
	abs. Richtung [°]	125	140	170	190	220	235	275	305	340	85	85	105
	stat. Druck [hPa]	126,5	119,8	119,8	109,8	109,8	83,8	94,4	94,4	109,8	146,6	136,5	139,9
	Gesamtdruck [hPa]	126	133	128	112	75	31	9	-2	13	45	87	114
	Geschwindigkeit [m/s]	-	45	35	18	-	-	-	-	-	-	-	-
	Temp. [°C]	23,0	23,5	23,5	23,5	23,5	23,5	23,5	23,5	23,0	23,0	23,0	23,0
ETT	tats. Radius [mm]	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0
4	abs. ETT [mm]	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4
Radius	Auswertungsebene	(+6)	(+6)	(+6)	(+6)	(+6)	(+6)	(+6)	(+6)	(+6)	(+6)	(+6)	(+6)
0	Anströmwinkel [°]	-345	-340	-350	-350	-340	-205	-185	-195	-120	-195	-195	-20
	abs. Richtung [°]	120	155	175	205	245	50	100	120	225	180	210	55
	stat. Druck [hPa]	104,7	104,7	104,7	104,7	104,7	104,7	104,7	104,7	104,7	104,7	104,7	104,7
	Gesamtdruck [hPa]	7	17	41	36	39	-1	5	3	2	16	35	2
	Geschwindigkeit [m/s]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Temp. [°C]	23,5	23,0	23,0	23,0	23,0	24,0	24,0	23,0	24,0	24,0	24,0	23,0

9.9.3 Ebene (+5)

	Position	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**
ETT	tats. Radius [mm]	29,3	33,3	34,3	29,3	29,3	29,3	31,7	29,3	31,7	31,7	29,3	29,3
3	abs. ETT [mm]	4,9	5,4	5,6	4,9	4,9	4,9	5,2	4,9	5,2	5,2	4,9	4,9
Radius	Auswertungsebene	(+5)	(+5)	(+4)	(+5)	(+5)	(+5)	(+5)	(+5)	(+5)	(+5)	(+5)	(+5)
26,5	Anströmwinkel [°]	0	-340	-335	0	0	0	-350	0	-350	-350	0	0
	abs. Richtung [°]	105	155	190	195	225	255	295	315	355	25	45	75
	stat. Druck [hPa]	270,2	310,3	320,3	270,2	270,2	270,2	293,6	270,2	293,6	293,6	270,2	270,2
	Gesamtdruck [hPa]	351	353	367	354	349	346	343	344	350	352	344	350
	Geschwindigkeit [m/s]	103	74	77	105	102	100	81	99	86	88	99	103
	Temp. [°C]	23,0	22,0	22,5	22,5	23,0	23,0	24,5	23,0	24,5	24,5	23,0	23,5
ETT	tats. Radius [mm]	21,0	21,7	20,0	17,7	17,7	21,7	21,0	20,0	21,0	21,7	21,0	21,7
4	abs. ETT [mm]	5,0	5,0	4,9	4,7	4,7	5,0	5,0	4,9	5,0	5,0	5,0	5,0
Radius	Auswertungsebene	(+5)	(+5)	(+5)	(+5)	(+5)	(+5)	(+5)	(+5)	(+5)	(+5)	(+5)	(+5)
17	Anströmwinkel [°]	-5	0	-10	-20	-20	0	-5	-10	-5	0	-5	0
	abs. Richtung [°]	100	135	155	175	205	255	280	305	340	15	40	75
	stat. Druck [hPa]	186,7	193,3	176,6	153,2	153,2	193,3	186,7	176,6	186,7	193,3	186,7	193,3
	Gesamtdruck [hPa]	285	287	283	280	271	266	256	257	263	267	278	284
	Geschwindigkeit [m/s]	118	115	123	135	130	101	99	107	104	102	114	113
	Temp. [°C]	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,5	25,0	25,5	25,0	25,5

ETT	tats. Radius [mm]	18,7	18,7	18,7	18,7	17,0	18,7	18,7	18,7	20,3	21,7	20,3	18,7
4	abs. ETT [mm]	4,8	4,8	4,8	4,8	4,6	4,8	4,8	4,8	4,9	5,0	4,9	4,8
Radius	Auswertungsebene	(+5)	(+5)	(+5)	(+5)	(+5)	(+5)	(+5)	(+5)	(+5)	(+5)	(+5)	(+5)
13	Anströmwinkel [°]	0	0	0	0	-10	0	0	0	-350	-340	-350	0
	abs. Richtung [°]	105	135	165	195	215	255	285	315	355	35	55	75
	stat. Druck [hPa]	163,3	163,3	163,3	163,3	146,6	163,3	163,3	163,3	180,0	193,3	180,0	163,3
	Gesamtdruck [hPa]	271	270	268	264	257	244	236	222	230	242	254	265
	Geschwindigkeit [m/s]	124	123	122	120	126	108	102	92	85	83	103	120
	Temp. [°C]	21,0	21,0	21,0	21,0	22,5	21,5	21,5	21,5	23,0	23,0	23,0	21,5
ETT	tats. Radius [mm]	18,3	18,3	15,0	15,3	15,3	14,3	18,7	19,3	21,0	19,7	19,7	21,0
4	abs. ETT [mm]	4,7	4,7	4,5	4,5	4,5	4,4	4,8	4,8	5,0	4,8	4,8	5,0
Radius	Auswertungsebene	(+5)	(+5)	(+6)	(+5)	(+5)	(+6)	(+5)	(+5)	(+5)	(+5)	(+5)	(+5)
11	Anströmwinkel [°]	-355	-355	-5	-15	-15	-10	-350	-345	-335	-340	-340	-335
	abs. Richtung [°]	110	140	160	180	210	245	295	330	10	35	65	100
	stat. Druck [hPa]	159,9	159,9	126,5	129,8	129,8	119,8	163,3	169,9	186,7	173,3	173,3	186,7
	Gesamtdruck [hPa]	253	255	255	254	230	213	188	176	188	212	226	243
	Geschwindigkeit [m/s]	116	117	137	135	121	118	60	30	14	75	87	90
	Temp. [°C]	23,5	23,5	23,5	23,5	22,5	22,5	23,0	23,5	23,5	22,5	22,5	23,5
ETT	tats. Radius [mm]	16,7	16,0	15,7	13,7	13,7	13,0	13,0	19,0	19,0	19,0	19,0	18,0
4	abs. ETT [mm]	4,6	4,6	4,5	4,4	4,4	4,4	4,4	4,8	4,8	4,8	4,8	4,7
Radius	Auswertungsebene	(+5)	(+5)	(+5)	(+6)	(+6)	(+6)	(+6)	(+5)	(+5)	(+5)	(+5)	(+5)
9	Anströmwinkel [°]	-355	0	-5	-15	-15	-20	-20	-335	-335	-335	-335	-345
	abs. Richtung [°]	110	135	160	180	210	235	265	340	10	40	70	90
	stat. Druck [hPa]	143,2	136,5	133,2	113,1	113,1	104,7	104,7	166,6	166,6	166,6	166,6	156,6
	Gesamtdruck [hPa]	249	254	252	249	237	211	183	175	186	207	222	237
	Geschwindigkeit [m/s]	124	131	131	141	135	126	109	35	53	76	89	108
	Temp. [°C]	22,0	22,5	22,0	22,0	22,0	22,5	22,5	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0
ETT	tats. Radius [mm]	15,0	14,3	14,3	13,3	13,3	12,3	12,7	12,7	13,3	17,0	16,0	16,3
4	abs. ETT [mm]	4,5	4,4	4,4	4,4	4,4	4,3	4,3	4,3	4,4	4,6	4,6	4,6
Radius	Auswertungsebene	(+6)	(+6)	(+6)	(+6)	(+6)	(+6)	(+6)	(+6)	(+6)	(+5)	(+5)	(+5)
4	Anströmwinkel [°]	-340	-355	-355	-5	-5	-20	-10	-10	-5	-290	-320	-330
	abs. Richtung [°]	125	140	170	190	220	235	275	305	340	85	85	105
	stat. Druck [hPa]	126,5	119,8	119,8	109,8	109,8	83,8	94,4	94,4	109,8	146,6	136,5	139,9
	Gesamtdruck [hPa]	126	133	128	112	75	31	9	-2	13	45	87	114
	Geschwindigkeit [m/s]	-	45	35	18	-	-	-	-	-	-	-	-
	Temp. [°C]	23,0	23,5	23,5	23,5	23,5	23,5	23,5	23,5	23,0	23,0	23,0	23,0

9.9.4 Ebene (+4)

	Position	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**
ETT	tats. Radius [mm]	29,3	29,3	34,3	32,7	33,3	33,3	32,7	31,7	31,7	31,7	29,3	29,3
4	abs. ETT [mm]	5,9	5,9	6,6	6,3	6,4	6,4	6,3	6,2	6,2	6,2	5,9	5,9
Radius	Auswertungsebene	(+4)	(+4)	(+3)	(+4)	(+4)	(+4)	(+4)	(+4)	(+4)	(+4)	(+4)	(+4)
26,5	Anströmwinkel [°]	0	0	-335	-345	-340	-340	-345	-350	-350	-350	0	0
	abs. Richtung [°]	105	135	190	210	245	275	300	325	355	25	45	75
	stat. Druck [hPa]	270,2	270,2	320,3	303,6	310,3	310,3	303,6	293,6	293,6	293,6	270,2	270,2
	Gesamtdruck [hPa]	350	352	369	355	358	351	343	346	349	351	349	348
	Geschwindigkeit [m/s]	103	104	79	82	79	73	72	83	85	87	102	101
	Temp. [°C]	22,0	22,0	22,5	23,0	23,0	22,5	22,5	23,0	23,5	23,0	22,0	22,0

ETT	tats. Radius [mm]	21,7	20,3	20,3	21,7	18,3	18,3	18,3	20,0	20,3	20,7	20,0	21,7
5	abs. ETT [mm]	6,0	5,9	5,9	6,0	5,7	5,7	5,7	5,9	5,9	5,9	5,9	6,0
Radius	Auswertungsebene	(+4)	(+4)	(+4)	(+4)	(+4)	(+4)	(+4)	(+4)	(+4)	(+4)	(+4)	(+4)
17	Anströmwinkel [°]	0	-5	-5	0	-15	-15	-15	-10	-5	-5	-10	0
	abs. Richtung [°]	105	130	160	195	210	240	270	305	340	10	35	75
	stat. Druck [hPa]	193,3	180,0	180,0	193,3	159,9	159,9	159,9	176,6	180,0	183,3	176,6	193,3
	Gesamtdruck [hPa]	284	284	282	281	272	267	260	263	261	268	277	282
	Geschwindigkeit [m/s]	113	122	120	111	127	124	120	111	108	110	119	112
	Temp. [°C]	23,0	25,0	25,0	22,5	25,0	25,0	25,5	23,5	25,0	25,0	23,5	23,5

9.9.5 Ebene (+3)

	Position	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**
ETT	tats. Radius [mm]	40,0	40,0	38,3	36,0	37,3	38,3	38,3	38,3	38,3	38,3	39,0	40,0
4	abs. ETT [mm]	7,5	7,5	7,2	6,8	7,1	7,2	7,2	7,2	7,2	7,2	7,3	7,5
Radius	Auswertungsebene	(+2)	(+2)	(+3)	(+3)	(+3)	(+3)	(+3)	(+3)	(+3)	(+3)	(+3)	(+2)
35,5	Anströmwinkel [°]	-350	-350	0	-10	-5	0	0	0	0	0	-350	-350
	abs. Richtung [°]	115	145	165	185	220	255	285	315	345	15	55	85
	stat. Druck [hPa]	377,1	377,1	360,4	337,0	350,4	360,4	360,4	360,4	360,4	360,4	367,1	377,1
	Gesamtdruck [hPa]	440	439	430	432	430	421	417	437	431	444	438	436
	Geschwindigkeit [m/s]	88	87	93	109	100	86	84	97	93	101	93	85
	Temp. [°C]	24,0	21,5	21,5	21,5	24,0	21,0	21,0	21,0	21,0	21,0	21,5	21,5
ETT	tats. Radius [mm]	35,3	36,3	35,3	33,3	35,3	35,3	36,3	35,3	31,7	35,3	31,7	36,3
5	abs. ETT [mm]	7,7	7,9	7,7	7,4	7,7	7,7	7,9	7,7	7,2	7,7	7,2	7,9
Radius	Auswertungsebene	(+2)	(+2)	(+2)	(+3)	(+2)	(+2)	(+2)	(+2)	(+3)	(+2)	(+3)	(+2)
26,5	Anströmwinkel [°]	-330	-320	-330	-340	-330	-330	-320	-330	-350	-330	-350	-320
	abs. Richtung [°]	135	175	195	215	255	285	325	345	355	45	55	115
	stat. Druck [hPa]	330,3	340,4	330,3	310,3	330,3	330,3	340,4	330,3	293,6	330,3	293,6	340,4
	Gesamtdruck [hPa]	348	357	386	362	364	346	359	350	346	349	348	356
	Geschwindigkeit [m/s]	48	46	84	82	66	45	49	50	83	49	84	45
	Temp. [°C]	22,5	22,0	22,5	23,0	22,5	23,0	22,5	22,5	23,5	22,5	23,5	22,0
ETT	tats. Radius [mm]	20,7	21,7	20,7	20,0	17,3	17,3	17,3	17,3	20,0	20,7	21,7	21,3
6	abs. ETT [mm]	6,9	7,0	6,9	6,9	6,7	6,7	6,7	6,7	6,9	6,9	7,0	7,0
Radius	Auswertungsebene	(+3)	(+3)	(+3)	(+3)	(+3)	(+3)	(+3)	(+3)	(+3)	(+3)	(+3)	(+3)
17	Anströmwinkel [°]	-5	0	-5	-10	-20	-20	-20	-20	-10	-5	0	0
	abs. Richtung [°]	100	135	160	185	205	235	265	295	335	10	45	75
	stat. Druck [hPa]	183,3	193,3	183,3	176,6	149,9	149,9	149,9	149,9	176,6	183,3	193,3	190,0
	Gesamtdruck [hPa]	281	280	280	278	271	270	267	266	261	265	272	276
	Geschwindigkeit [m/s]	117	110	117	120	132	132	130	129	110	108	105	110
	Temp. [°C]	24,0	22,0	23,0	23,0	23,5	23,5	23,5	23,5	23,0	24,0	22,0	22,0

9.9.1 Ebene (+2)

	Position	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
ETT	tats. Radius [mm]	38,3	38,3	37,3	36,0	35,3	38,3	37,3	38,3	39,3	37,3	38,3	37,3
5	abs. ETT [mm]	8,2	8,2	8,1	7,8	7,7	8,2	8,1	8,2	8,4	8,1	8,2	8,1
Radius	Auswertungsebene	(+2)	(+2)	(+2)	(+2)	(+2)	(+2)	(+2)	(+2)	(+2)	(+2)	(+2)	(+2)
35,5	Anströmwinkel [°]	0	0	-5	-10	-10	0	-5	0	-355	-5	0	-5
	abs. Richtung [°]	105	135	160	185	215	255	280	315	350	10	45	70
	stat. Druck [hPa]	360,4	360,4	350,4	337,0	330,3	360,4	350,4	360,4	370,4	350,4	360,4	350,4
	Gesamtdruck [hPa]	452	458	461	431	433	425	479	440	446	467	442	469
	Geschwindigkeit [m/s]	106	109	117	109	113	89	126	99	96	120	100	121
	Temp. [°C]	20,5	20,5	24,0	24,0	20,5	21,0	24,0	21,0	23,5	24,0	20,5	24,0
ETT	tats. Radius [mm]	35,3	36,3	35,3	36,3	33,3	32,0	36,3	35,3	36,3	35,3	37,7	35,3
6	abs. ETT [mm]	8,7	8,9	8,7	8,9	8,4	8,2	8,9	8,7	8,9	8,7	9,1	8,7
Radius	Auswertungsebene	(+1)	(+1)	(+1)	(+1)	(+2)	(+2)	(+1)	(+1)	(+1)	(+1)	(+1)	(+1)
26,5	Anströmwinkel [°]	-330	-320	-330	-320	-340	-350	-320	-330	-320	-330	-310	-330
	abs. Richtung [°]	135	175	195	235	245	265	325	345	25	45	95	105
	stat. Druck [hPa]	330,3	340,4	330,3	340,4	310,3	296,9	340,4	330,3	340,4	330,3	353,7	330,3
	Gesamtdruck [hPa]	346	406	388	560	371	344	388	343	403	355	640	381
	Geschwindigkeit [m/s]	45	91	86	163	89	79	78	40	89	56	185	81
	Temp. [°C]	24,0	24,0	24,0	23,5	24,5	24,0	24,0	24,5	24,0	24,5	24,5	24,5
ETT	tats. Radius [mm]	35,3	36,3	35,3	33,3	35,3	35,3	36,3	35,3	31,7	35,3	31,7	36,3
5	abs. ETT [mm]	7,7	7,9	7,7	7,4	7,7	7,7	7,9	7,7	7,2	7,7	7,2	7,9
Radius	Auswertungsebene	(+2)	(+2)	(+2)	(+3)	(+2)	(+2)	(+2)	(+2)	(+3)	(+2)	(+3)	(+2)
26,5	Anströmwinkel [°]	-330	-320	-330	-340	-330	-330	-320	-330	-350	-330	-350	-320
	abs. Richtung [°]	135	175	195	215	255	285	325	345	355	45	55	115
	stat. Druck [hPa]	330,3	340,4	330,3	310,3	330,3	330,3	340,4	330,3	293,6	330,3	293,6	340,4
	Gesamtdruck [hPa]	348	357	386	362	364	346	359	350	346	349	348	356
	Geschwindigkeit [m/s]	48	46	84	82	66	45	49	50	83	49	84	45
	Temp. [°C]	22,5	22,0	22,5	23,0	22,5	23,0	22,5	22,5	23,5	22,5	23,5	22,0
ETT	tats. Radius [mm]	21,3	21,7	20,7	21,7	20,0	18,3	18,3	17,3	17,3	21,7	21,7	21,7
7	abs. ETT [mm]	8,0	8,0	7,9	8,0	7,9	7,7	7,7	7,7	7,7	8,0	8,0	8,0
Radius	Auswertungsebene	(+2)	(+2)	(+2)	(+2)	(+2)	(+2)	(+2)	(+2)	(+2)	(+2)	(+2)	(+2)
17	Anströmwinkel [°]	0	0	-5	0	-10	-15	-15	-20	-20	0	0	0
	abs. Richtung [°]	105	135	160	195	215	240	270	295	325	15	45	75
	stat. Druck [hPa]	190,0	193,3	183,3	193,3	176,6	159,9	159,9	149,9	149,9	193,3	193,3	193,3
	Gesamtdruck [hPa]	278	279	277	275	271	268	263	266	265	262	268	274
	Geschwindigkeit [m/s]	111	109	115	107	116	125	122	129	129	98	102	106
	Temp. [°C]	22,0	22,0	23,0	21,5	24,0	24,0	24,0	23,0	22,5	22,0	22,0	22,0

9.9.2 Ebene (+1)

	Position	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
ETT	tats. Radius [mm]	37,3	37,3	36,0	37,3	35,0	37,3	36,0	36,0	37,3	38,3	38,3	37,3
6	abs. ETT [mm]	9,1	9,1	8,8	9,1	8,7	9,1	8,8	8,8	9,1	9,2	9,2	9,1
Radius	Auswertungsebene	(+1)	(+1)	(+1)	(+1)	(+1)	(+1)	(+1)	(+1)	(+1)	(+1)	(+1)	(+1)
35,5	Anströmwinkel [°]	-5	-5	-10	-5	-15	-5	-10	-10	-5	0	0	-5
	abs. Richtung [°]	100	130	155	190	210	250	275	305	340	15	45	70
	stat. Druck [hPa]	350,4	350,4	337,0	350,4	327,0	350,4	337,0	337,0	350,4	360,4	360,4	350,4
	Gesamtdruck [hPa]	451	528	458	898	430	415	460	433	532	448	437	475
	Geschwindigkeit [m/s]	112	147	122	248	114	90	123	109	149	104	97	124
	Temp. [°C]	24,0	24,0	21,5	21,0	23,5	23,5	21,5	21,5	24,0	20,5	20,5	24,0
ETT	tats. Radius [mm]	35,3	36,3	35,3	35,7	33,3	33,0	35,7	33,3	35,7	35,3	37,7	35,3
7	abs. ETT [mm]	9,7	9,9	9,7	9,8	9,4	9,4	9,8	9,4	9,8	9,7	10,1	9,7
Radius	Auswertungsebene	(-1)	(-1)	(-1)	(-1)	(+1)	(+1)	(-1)	(+1)	(-1)	(-1)	(-1)	(-1)
26,5	Anströmwinkel [°]	-330	-320	-330	-325	-340	-345	-325	-340	-325	-330	-310	-330
	abs. Richtung [°]	135	175	195	230	245	270	320	335	20	45	95	105
	stat. Druck [hPa]	330,3	340,4	330,3	333,7	310,3	307,0	333,7	310,3	333,7	330,3	353,7	330,3
	Gesamtdruck [hPa]	346	414	382	646	366	338	374	331	425	352	470	385
	Geschwindigkeit [m/s]	45	97	81	193	85	64	72	52	107	53	120	84
	Temp. [°C]	25,0	25,0	25,0	23,0	25,0	23,0	22,5	25,0	22,5	25,0	25,0	25,0
ETT	tats. Radius [mm]	27,3	30,0	30,0	27,3	27,3	27,3	27,3	27,3	27,3	27,3	30,0	27,3
7	abs. ETT [mm]	8,6	9,0	9,0	8,6	8,6	8,6	8,6	8,6	8,6	8,6	9,0	8,6
Radius	Auswertungsebene	(+1)	(+1)	(+1)	(+1)	(+1)	(+1)	(+1)	(+1)	(+1)	(+1)	(+1)	(+1)
26,5	Anströmwinkel [°]	-10	0	0	-10	-10	-10	-10	-10	-10	-10	0	-10
	abs. Richtung [°]	95	135	165	185	215	245	275	305	335	5	45	65
B	stat. Druck [hPa]	250,1	276,9	276,9	250,1	250,1	250,1	250,1	250,1	250,1	250,1	276,9	250,1
	Gesamtdruck [hPa]	330	336	342	331	328	325	323	325	326	323	332	326
	Geschwindigkeit [m/s]	104	89	93	104	103	100	99	101	101	99	86	101
	Temp. [°C]	25,0	25,0	25,0	23,0	25,0	23,0	22,5	25,0	22,5	25,0	25,0	25,0
ETT	tats. Radius [mm]	35,3	36,3	35,3	36,3	33,3	32,0	36,3	35,3	36,3	35,3	37,7	35,3
6	abs. ETT [mm]	8,7	8,9	8,7	8,9	8,4	8,2	8,9	8,7	8,9	8,7	9,1	8,7
Radius	Auswertungsebene	(+1)	(+1)	(+1)	(+1)	(+2)	(+2)	(+1)	(+1)	(+1)	(+1)	(+1)	(+1)
26,5	Anströmwinkel [°]	-330	-320	-330	-320	-340	-350	-320	-330	-320	-330	-310	-330
	abs. Richtung [°]	135	175	195	235	245	265	325	345	25	45	95	105
	stat. Druck [hPa]	330,3	340,4	330,3	340,4	310,3	296,9	340,4	330,3	340,4	330,3	353,7	330,3
	Gesamtdruck [hPa]	346	406	388	560	371	344	388	343	403	355	640	381
	Geschwindigkeit [m/s]	45	91	86	163	89	79	78	40	89	56	185	81
	Temp. [°C]	24,0	24,0	24,0	23,5	24,5	24,0	24,0	24,5	24,0	24,5	24,5	24,5
ETT	tats. Radius [mm]	22,7	21,7	21,7	21,7	20,3	20,3	18,3	20,7	17,3	20,7	21,7	21,7
8	abs. ETT [mm]	9,1	9,0	9,0	9,0	8,9	8,9	8,7	8,9	8,7	8,9	9,0	9,0
Radius	Auswertungsebene	(+1)	(+1)	(+1)	(+1)	(+1)	(+1)	(+1)	(+1)	(+1)	(+1)	(+1)	(+1)
17	Anströmwinkel [°]	-355	0	0	0	-5	-5	-15	-5	-20	-5	0	0
	abs. Richtung [°]	110	135	165	195	220	250	270	310	325	10	45	75
	stat. Druck [hPa]	203,4	193,3	193,3	193,3	180,0	180,0	159,9	183,3	149,9	183,3	193,3	193,3
	Gesamtdruck [hPa]	278	288	291	288	283	280	278	277	276	273	276	282
	Geschwindigkeit [m/s]	102	115	117	115	120	119	130	115	134	113	108	111
	Temp. [°C]	22,0	22,5	23,0	23,0	21,0	21,5	21,5	21,5	22,5	23,0	22,5	22,5

9.9.3 Ebene (-1)

	Position	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
ETT	tats. Radius [mm]	38,3	37,3	36,0	37,3	34,0	38,3	36,0	36,0	37,3	36,0	38,3	36,0
7	abs. ETT [mm]	10,2	10,1	9,8	10,1	9,5	10,2	9,8	9,8	10,1	9,8	10,2	9,8
Radius	Auswertungsebene	(-1)	(-1)	(-1)	(-1)	(-1)	(-1)	(-1)	(-1)	(-1)	(-1)	(-1)	(-1)
35,5	Anströmwinkel [°]	0	-5	-10	-5	-20	0	-10	-10	-5	-15	0	-15
	abs. Richtung [°]	105	130	155	190	205	255	275	305	340	360	45	60
	stat. Druck [hPa]	360,4	350,4	337,0	350,4	317,0	360,4	337,0	337,0	350,4	337,0	360,4	337,0
	Gesamtdruck [hPa]	450	541	468	750	428	417	516	442	610	461	437	491
	Geschwindigkeit [m/s]	105	152	127	215	118	84	148	114	176	124	97	138
	Temp. [°C]	21,0	24,0	21,5	23,5	22,0	21,5	22,0	22,0	23,5	23,5	21,0	23,5
ETT	tats. Radius [mm]	35,3	36,3	35,3	36,3	34,3	31,7	36,3	33,3	36,3	35,3	33,3	35,3
8	abs. ETT [mm]	10,7	10,9	10,7	10,9	10,6	10,2	10,9	10,4	10,9	10,7	10,4	10,7
Radius	Auswertungsebene	(-2)	(-2)	(-2)	(-2)	(-2)	(-1)	(-2)	(-1)	(-2)	(-2)	(-1)	(-2)
26,5	Anströmwinkel [°]	-330	-320	-330	-320	-335	-350	-320	-340	-320	-330	-340	-330
	abs. Richtung [°]	135	175	195	235	250	265	325	335	25	45	65	105
	stat. Druck [hPa]	330,3	340,4	330,3	340,4	320,3	293,6	340,4	310,3	340,4	330,3	310,3	330,3
	Gesamtdruck [hPa]	338	379	364	396	355	337	344	331	398	352	330	384
	Geschwindigkeit [m/s]	31	70	65	83	67	75	21	52	85	53	51	82
	Temp. [°C]	21,0	21,0	21,0	20,5	23,0	21,0	21,0	21,0	21,0	21,0	21,5	21,0
ETT	tats. Radius [mm]	35,3	36,3	35,3	35,7	33,3	33,0	35,7	33,3	35,7	35,3	37,7	35,3
7	abs. ETT [mm]	9,7	9,9	9,7	9,8	9,4	9,4	9,8	9,4	9,8	9,7	10,1	9,7
Radius	Auswertungsebene	(-1)	(-1)	(-1)	(-1)	(+1)	(+1)	(-1)	(+1)	(-1)	(-1)	(-1)	(-1)
26,5	Anströmwinkel [°]	-330	-320	-330	-325	-340	-345	-325	-340	-325	-330	-310	-330
	abs. Richtung [°]	135	175	195	230	245	270	320	335	20	45	95	105
	stat. Druck [hPa]	330,3	340,4	330,3	333,7	310,3	307,0	333,7	310,3	333,7	330,3	353,7	330,3
	Gesamtdruck [hPa]	346	414	382	646	366	338	374	331	425	352	470	385
	Geschwindigkeit [m/s]	45	97	81	193	85	64	72	52	107	53	120	84
	Temp. [°C]	25,0	25,0	25,0	23,0	25,0	23,0	22,5	25,0	22,5	25,0	25,0	25,0
ETT	tats. Radius [mm]	27,3	30,0	30,0	30,0	30,0	27,3	30,0	27,3	27,3	27,3	27,3	27,3
8	abs. ETT [mm]	9,6	10,0	10,0	10,0	10,0	9,6	10,0	9,6	9,6	9,6	9,6	9,6
Radius	Auswertungsebene	(-1)	(-1)	(-1)	(-1)	(-1)	(-1)	(-1)	(-1)	(-1)	(-1)	(-1)	(-1)
26,5	Anströmwinkel [°]	-10	0	0	0	0	-10	0	-10	-10	-10	-10	-10
	abs. Richtung [°]	95	135	165	195	225	245	285	305	335	5	35	65
B	stat. Druck [hPa]	250,1	276,9	276,9	276,9	276,9	250,1	276,9	250,1	250,1	250,1	250,1	250,1
	Gesamtdruck [hPa]	323	339	341	345	335	322	322	322	323	325	321	323
	Geschwindigkeit [m/s]	99	90	92	94	88	98	77	98	99	100	97	99
	Temp. [°C]	21,0	21,0	21,0	20,5	23,0	21,0	21,0	21,0	21,0	21,0	21,5	21,0
ETT	tats. Radius [mm]	21,7	21,7	21,7	21,7	20,7	21,7	20,0	20,0	20,0	20,0	21,7	21,7
9	abs. ETT [mm]	10,0	10,0	10,0	10,0	9,9	10,0	9,9	9,9	9,9	9,9	10,0	10,0
Radius	Auswertungsebene	(-1)	(-1)	(-1)	(-1)	(-1)	(-1)	(-1)	(-1)	(-1)	(-1)	(-1)	(-1)
17	Anströmwinkel [°]	0	0	0	0	-5	0	-10	-10	-10	-10	0	0
	abs. Richtung [°]	105	135	165	195	220	255	275	305	335	5	45	75
	stat. Druck [hPa]	193,3	193,3	193,3	193,3	183,3	193,3	176,6	176,6	176,6	176,6	193,3	193,3
	Gesamtdruck [hPa]	279	282	284	287	278	277	275	275	272	271	272	274
	Geschwindigkeit [m/s]	109	111	112	114	115	108	118	118	116	115	105	106
	Temp. [°C]	21,5	21,5	22,0	21,5	21,5	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0	21,5

9.9.4 Ebene (-2)

	Position	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
ETT	tats. Radius [mm]	38,3	37,3	36,0	36,0	34,0	38,3	37,3	37,3	38,3	35,0	38,3	37,3
8	abs. ETT [mm]	11,2	11,1	10,8	10,8	10,5	11,2	11,1	11,1	11,2	10,7	11,2	11,1
Radius	Auswertungsebene	(-2)	(-2)	(-2)	(-2)	(-2)	(-2)	(-2)	(-2)	(-2)	(-2)	(-2)	(-2)
35,5	Anströmwinkel [°]	0	-5	-10	-10	-20	0	-5	-5	0	-15	0	-5
	abs. Richtung [°]	105	130	155	185	205	255	280	310	345	360	45	70
	stat. Druck [hPa]	360,4	350,4	337,0	337,0	317,0	360,4	350,4	350,4	360,4	327,0	360,4	350,4
	Gesamtdruck [hPa]	442	514	465	422	420	409	513	436	538	450	423	486
	Geschwindigkeit [m/s]	100	141	126	103	114	78	141	103	146	124	88	129
	Temp. [°C]	21,5	22,0	24,0	23,0	23,0	22,5	22,5	22,5	22,0	23,0	21,5	22,5
ETT	tats. Radius [mm]	31,7	33,3	35,3	29,3	31,7	31,7	31,7	29,3	31,7	33,3	33,0	35,3
9	abs. ETT [mm]	11,2	11,4	11,7	10,9	11,2	11,2	11,2	10,9	11,2	11,4	11,4	11,7
Radius	Auswertungsebene	(-2)	(-2)	(-3)	(-2)	(-2)	(-2)	(-2)	(-2)	(-2)	(-2)	(-2)	(-3)
26,5	Anströmwinkel [°]	-350	-340	-330	0	-350	-350	-350	0	-350	-340	-345	-330
	abs. Richtung [°]	115	155	195	195	235	265	295	315	355	35	60	105
	stat. Druck [hPa]	293,6	310,3	330,3	270,2	293,6	293,6	293,6	270,2	293,6	310,3	307,0	330,3
	Gesamtdruck [hPa]	336	337	351	347	340	336	328	332	327	335	330	339
	Geschwindigkeit [m/s]	75	59	52	101	78	75	67	91	66	57	55	34
	Temp. [°C]	25,0	24,5	25,5	23,5	24,5	24,5	24,5	22,5	25,0	24,5	22,5	25,5
ETT	tats. Radius [mm]	35,3	36,3	35,3	36,3	34,3	31,7	36,3	33,3	36,3	35,3	33,3	35,3
8	abs. ETT [mm]	10,7	10,9	10,7	10,9	10,6	10,2	10,9	10,4	10,9	10,7	10,4	10,7
Radius	Auswertungsebene	(-2)	(-2)	(-2)	(-2)	(-2)	(-1)	(-2)	(-1)	(-2)	(-2)	(-1)	(-2)
26,5	Anströmwinkel [°]	-330	-320	-330	-320	-335	-350	-320	-340	-320	-330	-340	-330
	abs. Richtung [°]	135	175	195	235	250	265	325	335	25	45	65	105
	stat. Druck [hPa]	330,3	340,4	330,3	340,4	320,3	293,6	340,4	310,3	340,4	330,3	310,3	330,3
	Gesamtdruck [hPa]	338	379	364	396	355	337	344	331	398	352	330	384
	Geschwindigkeit [m/s]	31	70	65	83	67	75	21	52	85	53	51	82
	Temp. [°C]	21,0	21,0	21,0	20,5	23,0	21,0	21,0	21,0	21,0	21,0	21,5	21,0
ETT	tats. Radius [mm]	22,7	23,3	23,3	23,0	22,7	21,7	20,7	20,7	20,7	20,7	21,7	22,7
10	abs. ETT [mm]	11,1	11,2	11,2	11,2	11,1	11,0	10,9	10,9	10,9	10,9	11,0	11,1
Radius	Auswertungsebene	(-2)	(-2)	(-2)	(-2)	(-2)	(-2)	(-2)	(-2)	(-2)	(-2)	(-2)	(-2)
17	Anströmwinkel [°]	-355	-350	-350	-350	-355	0	-5	-5	-5	-5	-5	-355
	abs. Richtung [°]	110	145	175	205	230	255	280	310	340	10	40	80
	stat. Druck [hPa]	203,4	210,0	210,0	206,7	203,4	193,3	183,3	183,3	183,3	183,3	193,3	203,4
	Gesamtdruck [hPa]	279	283	286	284	279	278	275	274	272	271	271	275
	Geschwindigkeit [m/s]	103	101	103	104	103	109	114	113	112	111	104	100
	Temp. [°C]	22,5	22,5	22,5	22,5	22,5	21,0	22,5	22,5	22,5	22,5	22,5	22,5

9.9.5 Ebene (-3)

	Position	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
ETT	tats. Radius [mm]	38,3	38,3	36,0	36,0	36,0	36,0	36,0	36,0	38,3	38,3	38,3	36,7
9	abs. ETT [mm]	12,2	12,2	11,8	11,8	11,8	11,8	11,8	11,8	12,2	12,2	12,2	11,9
Radius	Auswertungsebene	(-3)	(-3)	(-3)	(-3)	(-3)	(-3)	(-3)	(-3)	(-3)	(-3)	(-3)	(-3)
35,5	Anströmwinkel [°]	0	0	-10	-10	-10	-10	-10	-10	0	0	0	-5
	abs. Richtung [°]	105	135	155	185	215	245	275	305	345	15	45	70
	stat. Druck [hPa]	360,4	360,4	337,0	337,0	337,0	337,0	337,0	337,0	360,4	360,4	360,4	343,7
	Gesamtdruck [hPa]	435	481	452	421	415	402	471	432	508	433	419	456
	Geschwindigkeit [m/s]	96	122	120	103	99	91	129	109	134	95	85	118
	Temp. [°C]	23,0	23,0	23,0	23,5	23,5	23,5	23,5	23,5	23,0	23,0	23,0	23,5
ETT	tats. Radius [mm]	33,3	31,7	34,7	29,3	30,3	31,0	31,7	31,7	33,3	33,3	33,3	31,7
10	abs. ETT [mm]	12,4	12,2	12,6	11,9	12,0	12,1	12,2	12,2	12,4	12,4	12,4	12,2
Radius	Auswertungsebene	(-3)	(-3)	(-4)	(-3)	(-3)	(-3)	(-3)	(-3)	(-3)	(-3)	(-3)	(-3)
26,5	Anströmwinkel [°]	-340	-350	-335	0	-355	-350	-350	-350	-340	-340	-340	-350
	abs. Richtung [°]	125	145	190	195	230	265	295	325	5	35	65	85
	stat. Druck [hPa]	310,3	293,6	323,7	270,2	280,2	286,9	293,6	293,6	310,3	310,3	310,3	293,6
	Gesamtdruck [hPa]	333	335	344	342	334	331	326	330	327	328	329	331
	Geschwindigkeit [m/s]	55	74	51	98	84	76	66	69	47	48	50	70
	Temp. [°C]	25,0	25,0	23,0	25,0	23,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0
ETT	tats. Radius [mm]	31,7	33,3	35,3	29,3	31,7	31,7	31,7	29,3	31,7	33,3	33,0	35,3
9	abs. ETT [mm]	11,2	11,4	11,7	10,9	11,2	11,2	11,2	10,9	11,2	11,4	11,4	11,7
Radius	Auswertungsebene	(-2)	(-2)	(-3)	(-2)	(-2)	(-2)	(-2)	(-2)	(-2)	(-2)	(-2)	(-3)
26,5	Anströmwinkel [°]	-350	-340	-330	0	-350	-350	-350	0	-350	-340	-345	-330
	abs. Richtung [°]	115	155	195	195	235	265	295	315	355	35	60	105
	stat. Druck [hPa]	293,6	310,3	330,3	270,2	293,6	293,6	293,6	270,2	293,6	310,3	307,0	330,3
	Gesamtdruck [hPa]	336	337	351	347	340	336	328	332	327	335	330	339
	Geschwindigkeit [m/s]	75	59	52	101	78	75	67	91	66	57	55	34
	Temp. [°C]	25,0	24,5	25,5	23,5	24,5	24,5	24,5	22,5	25,0	24,5	22,5	25,5
ETT	tats. Radius [mm]	21,7	22,7	23,3	22,7	23,0	21,7	21,7	21,3	21,3	20,7	20,7	22,7
11	abs. ETT [mm]	12,0	12,1	12,2	12,1	12,2	12,0	12,0	12,0	12,0	11,9	11,9	12,1
Radius	Auswertungsebene	(-3)	(-3)	(-3)	(-3)	(-3)	(-3)	(-3)	(-3)	(-3)	(-3)	(-3)	(-3)
17	Anströmwinkel [°]	0	-355	-350	-355	-355	0	0	0	0	-5	-5	-355
	abs. Richtung [°]	105	140	175	200	230	255	285	315	345	10	40	80
	stat. Druck [hPa]	193,3	203,4	210,0	203,4	206,7	193,3	193,3	190,0	190,0	183,3	183,3	203,4
	Gesamtdruck [hPa]	276	280	284	283	282	279	276	273	272	273	271	275
	Geschwindigkeit [m/s]	108	103	101	105	102	109	108	108	107	113	111	100
	Temp. [°C]	22,5	23,0	23,0	23,0	23,0	22,5	23,0	22,5	22,5	23,0	23,0	23,0

9.9.6 Ebene (-4)

	Position	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
ETT	tats. Radius [mm]	38,3	38,3	36,0	36,0	38,3	38,3	38,3	38,3	38,3	38,3	38,3	38,3
10	abs. ETT [mm]	13,2	13,2	12,8	12,8	13,2	13,2	13,2	13,2	13,2	13,2	13,2	13,2
Radius	Auswertungsebene	(-4)	(-4)	(-4)	(-4)	(-4)	(-4)	(-4)	(-4)	(-4)	(-4)	(-4)	(-4)
35,5	Anströmwinkel [°]	0	0	-10	-10	0	0	0	0	0	0	0	0
	abs. Richtung [°]	105	135	155	185	225	255	285	315	345	15	45	75
	stat. Druck [hPa]	360,4	360,4	337,0	337,0	360,4	360,4	360,4	360,4	360,4	360,4	360,4	360,4
	Gesamtdruck [hPa]	431	425	433	418	411	400	399	413	413	418	416	418
	Geschwindigkeit [m/s]	94	89	110	101	79	70	69	81	81	85	83	85
	Temp. [°C]	23,0	22,0	23,0	23,0	22,5	23,0	23,5	22,5	23,0	22,5	22,5	22,5
ETT	tats. Radius [mm]	31,7	32,7	32,7	29,3	28,7	30,3	28,7	29,7	31,7	31,7	31,7	31,7
11	abs. ETT [mm]	13,2	13,3	13,3	12,9	12,8	13,0	12,8	12,9	13,2	13,2	13,2	13,2
Radius	Auswertungsebene	(-4)	(-4)	(-4)	(-4)	(-4)	(-4)	(-4)	(-4)	(-4)	(-4)	(-4)	(-4)
26,5	Anströmwinkel [°]	-350	-345	-345	0	0	-350	0	-350	-350	-350	-350	-350
	abs. Richtung [°]	115	150	180	195	225	265	285	325	355	25	55	85
	stat. Druck [hPa]	293,6	303,6	303,6	270,2	263,5	280,2	263,5	273,5	293,6	293,6	293,6	293,6
	Gesamtdruck [hPa]	332	334	344	338	334	329	326	331	333	332	331	333
	Geschwindigkeit [m/s]	71	63	72	95	97	81	92	87	72	71	70	72
	Temp. [°C]	24,5	21,5	21,5	24,5	25,0	24,5	25,0	24,0	24,5	24,5	24,5	24,5
ETT	tats. Radius [mm]	33,3	31,7	34,7	29,3	30,3	31,0	31,7	31,7	33,3	33,3	33,3	31,7
10	abs. ETT [mm]	12,4	12,2	12,6	11,9	12,0	12,1	12,2	12,2	12,4	12,4	12,4	12,2
Radius	Auswertungsebene	(-3)	(-3)	(-4)	(-3)	(-3)	(-3)	(-3)	(-3)	(-3)	(-3)	(-3)	(-3)
26,5	Anströmwinkel [°]	-340	-350	-335	0	-355	-350	-350	-350	-340	-340	-340	-350
	abs. Richtung [°]	125	145	190	195	230	265	295	325	5	35	65	85
	stat. Druck [hPa]	310,3	293,6	323,7	270,2	280,2	286,9	293,6	293,6	310,3	310,3	310,3	293,6
	Gesamtdruck [hPa]	333	335	344	342	334	331	326	330	327	328	329	331
	Geschwindigkeit [m/s]	55	74	51	98	84	76	66	69	47	48	50	70
	Temp. [°C]	25,0	25,0	23,0	25,0	23,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0
ETT	tats. Radius [mm]	22,7	23,3	24,3	22,7	22,7	22,3	22,3	21,7	20,7	20,7	21,7	22,7
12	abs. ETT [mm]	13,1	13,2	13,3	13,1	13,1	13,1	13,1	13,0	12,9	12,9	13,0	13,1
Radius	Auswertungsebene	(-4)	(-4)	(-4)	(-4)	(-4)	(-4)	(-4)	(-4)	(-4)	(-4)	(-4)	(-4)
17	Anströmwinkel [°]	-355	-350	-345	-355	-355	0	0	0	-5	-5	0	-355
	abs. Richtung [°]	110	145	180	200	230	255	285	315	340	10	45	80
	stat. Druck [hPa]	203,4	210,0	220,1	203,4	203,4	200,0	200,0	193,3	183,3	183,3	193,3	203,4
	Gesamtdruck [hPa]	275	279	288	287	285	283	280	279	279	278	274	273
	Geschwindigkeit [m/s]	100	98	96	108	106	107	105	109	116	115	106	98
	Temp. [°C]	21,5	23,5	21,0	21,5	22,0	21,5	21,5	21,5	22,5	22,5	21,0	22,0

9.9.7 Ebene (-5)

	Position	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
ETT	tats. Radius [mm]	38,3	40,0	36,0	36,0	38,3	36,0	38,3	37,3	38,3	38,3	38,3	38,3
11	abs. ETT [mm]	14,2	14,5	13,8	13,8	14,2	13,8	14,2	14,1	14,2	14,2	14,2	14,2
Radius	Auswertungsebene	(-5)	(-6)	(-5)	(-5)	(-5)	(-5)	(-5)	(-5)	(-5)	(-5)	(-5)	(-5)
35,5	Anströmwinkel [°]	0	-350	-10	-10	0	-10	0	-5	0	0	0	0
	abs. Richtung [°]	105	145	155	185	225	245	285	310	345	15	45	75
	stat. Druck [hPa]	360,4	377,1	337,0	337,0	360,4	337,0	360,4	350,4	360,4	360,4	360,4	360,4
	Gesamtdruck [hPa]	421	419	431	415	409	393	397	405	408	405	407	410
	Geschwindigkeit [m/s]	87	72	108	99	78	84	65	83	77	75	76	79
	Temp. [°C]	23,5	24,5	22,0	23,5	23,5	23,0	4,0	23,5	23,5	23,5	23,5	23,5
ETT	tats. Radius [mm]	33,3	35,7	33,3	33,3	28,7	28,7	35,0	33,3	33,3	33,3	34,3	33,3
12	abs. ETT [mm]	14,4	14,8	14,4	14,4	13,8	13,8	14,7	14,4	14,4	14,4	14,6	14,4
Radius	Auswertungsebene	(-5)	(-6)	(-5)	(-5)	(-5)	(-5)	(-6)	(-5)	(-5)	(-5)	(-6)	(-5)
26,5	Anströmwinkel [°]	-340	-335	-340	-340	-5	-5	-330	-340	-340	-340	-335	-340
	abs. Richtung [°]	125	160	185	215	220	250	315	335	5	35	70	95
	stat. Druck [hPa]	310,3	333,7	310,3	310,3	263,5	263,5	327,0	310,3	310,3	310,3	320,3	310,3
	Gesamtdruck [hPa]	340	345	355	341	331	325	324	334	331	332	337	338
	Geschwindigkeit [m/s]	62	38	76	63	95	91	-	56	52	53	46	60
	Temp. [°C]	24,0	22,0	24,0	24,0	22,5	22,5	24,5	24,5	24,5	24,5	22,5	24,0
ETT	tats. Radius [mm]	24,3	24,3	24,3	22,7	22,7	22,0	21,0	21,0	20,7	20,7	20,7	21,7
13	abs. ETT [mm]	14,3	14,3	14,3	14,1	14,1	14,1	14,0	14,0	13,9	13,9	13,9	14,0
Radius	Auswertungsebene	(-5)	(-5)	(-5)	(-5)	(-5)	(-5)	(-5)	(-5)	(-5)	(-5)	(-5)	(-5)
17	Anströmwinkel [°]	-345	-345	-345	-355	-355	0	0	0	0	-5	-5	0
	abs. Richtung [°]	120	150	180	200	230	255	285	315	345	10	40	75
	stat. Druck [hPa]	220,1	220,1	220,1	203,4	203,4	196,7	186,7	186,7	183,3	183,3	183,3	193,3
	Gesamtdruck [hPa]	266	276	285	286	286	284	282	281	280	279	274	271
	Geschwindigkeit [m/s]	80	88	95	108	108	111	116	116	117	116	113	105
	Temp. [°C]	24,5	24,5	24,5	25,0	25,0	25,0	25,0	25,5	26,0	24,5	24,5	26,5

9.9.8 Ebene (-6)

	Position	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
ETT	tats. Radius [mm]	33,3	33,3	34,7	32,7	31,7	31,7	31,7	31,7	31,7	32,7	32,7	32,7
13	abs. ETT [mm]	15,4	15,4	15,6	15,3	15,2	15,2	15,2	15,2	15,2	15,3	15,3	15,3
Radius	Auswertungsebene	(-6)	(-6)	(-7)	(-6)	(-6)	(-6)	(-6)	(-6)	(-6)	(-6)	(-6)	(-6)
26,5	Anströmwinkel [°]	-340	-340	-335	-345	-350	-350	-350	-350	-350	-340	-340	-340
	abs. Richtung [°]	125	155	190	210	235	265	295	325	355	35	65	95
	stat. Druck [hPa]	310,3	310,3	323,7	303,6	293,6	293,6	293,6	293,6	293,6	303,6	303,6	303,6
	Gesamtdruck [hPa]	352	352	359	348	341	339	334	339	345	344	349	347
	Geschwindigkeit [m/s]	74	74	67	76	79	77	73	77	82	73	77	75
	Temp. [°C]	24,0	24,0	22,5	22,5	24,5	24,5	24,5	24,5	24,5	24,0	24,5	24,0

ETT	tats. Radius [mm]	33,3	35,7	33,3	33,3	28,7	28,7	35,0	33,3	33,3	33,3	34,3	33,3
12	abs. ETT [mm]	14,4	14,8	14,4	14,4	13,8	13,8	14,7	14,4	14,4	14,4	14,6	14,4
Radius	Auswertungsebene	(-5)	(-6)	(-5)	(-5)	(-5)	(-5)	(-6)	(-5)	(-5)	(-5)	(-6)	(-5)
26,5	Anströmwinkel [°]	-340	-335	-340	-340	-5	-5	-330	-340	-340	-340	-335	-340
	abs. Richtung [°]	125	160	185	215	220	250	315	335	5	35	70	95
	stat. Druck [hPa]	310,3	333,7	310,3	310,3	263,5	263,5	327,0	310,3	310,3	310,3	320,3	310,3
	Gesamtdruck [hPa]	340	345	355	341	331	325	324	334	331	332	337	338
	Geschwindigkeit [m/s]	62	38	76	63	95	91	-	56	52	53	46	60
	Temp. [°C]	24,0	22,0	24,0	24,0	22,5	22,5	24,5	24,5	24,5	24,5	22,5	24,0

9.9.9 Ebene (-7)

	Position	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**
ETT	tats. Radius [mm]	30,3	30,3	30,3	30,3	30,3	30,3	30,3	30,3	30,3	30,3	29,3	30,3
14	abs. ETT [mm]	16,0	16,0	16,0	16,0	16,0	16,0	16,0	16,0	16,0	16,0	15,9	16,0
Radius	Auswertungsebene	(-7)	(-7)	(-7)	(-7)	(-7)	(-7)	(-7)	(-7)	(-7)	(-7)	(-7)	(-7)
26,5	Anströmwinkel [°]	-355	-355	-355	-355	-355	-355	-355	-355	-355	-355	0	-355
	abs. Richtung [°]	110	140	170	200	230	260	290	320	350	20	45	80
	stat. Druck [hPa]	280,2	280,2	280,2	280,2	280,2	280,2	280,2	280,2	280,2	280,2	270,2	280,2
	Gesamtdruck [hPa]	338	333	335	342	333	326	326	330	332	334	334	336
	Geschwindigkeit [m/s]	87	83	85	90	83	78	78	81	83	84	92	86
	Temp. [°C]	22,5	22,5	22,5	22,5	22,0	22,0	22,5	22,0	22,5	22,5	24,0	22,5
ETT	tats. Radius [mm]	33,3	33,3	34,7	32,7	31,7	31,7	31,7	31,7	31,7	32,7	32,7	32,7
13	abs. ETT [mm]	15,4	15,4	15,6	15,3	15,2	15,2	15,2	15,2	15,2	15,3	15,3	15,3
Radius	Auswertungsebene	(-6)	(-6)	(-7)	(-6)	(-6)	(-6)	(-6)	(-6)	(-6)	(-6)	(-6)	(-6)
26,5	Anströmwinkel [°]	-340	-340	-335	-345	-350	-350	-350	-350	-350	-340	-340	-340
	abs. Richtung [°]	125	155	190	210	235	265	295	325	355	35	65	95
	stat. Druck [hPa]	310,3	310,3	323,7	303,6	293,6	293,6	293,6	293,6	293,6	303,6	303,6	303,6
	Gesamtdruck [hPa]	352	352	359	348	341	339	334	339	345	344	349	347
	Geschwindigkeit [m/s]	74	74	67	76	79	77	73	77	82	73	77	75
	Temp. [°C]	24,0	24,0	22,5	22,5	24,5	24,5	24,5	24,5	24,5	24,0	24,5	24,0
ETT	tats. Radius [mm]	32,7	32,3	31,7	30,3	30,0	30,0	29,3	29,3	29,3	28,7	28,7	28,7
14	abs. ETT [mm]	16,3	16,3	16,2	16,0	16,0	16,0	15,9	15,9	15,9	15,8	15,8	15,8
Radius	Auswertungsebene	(-7)	(-7)	(-7)	(-7)	(-7)	(-7)	(-7)	(-7)	(-7)	(-7)	(-7)	(-7)
17	Anströmwinkel [°]	-355	-355	-355	-355	-355	-355	-355	-355	-355	-355	0	-355
	abs. Richtung [°]	110	140	170	200	230	260	290	320	350	20	45	80
	stat. Druck [hPa]	303,6	300,3	293,6	280,2	276,9	276,9	270,2	270,2	270,2	263,5	263,5	263,5
	Gesamtdruck [hPa]	265	272	280	282	280	280	280	280	281	281	276	267
	Geschwindigkeit [m/s]	-	-	-	15	21	21	36	36	38	49	41	22
	Temp. [°C]	24,0	24,0	24,0	24,0	24,0	24,0	24,0	24,0	24,0	24,0	24,0	24,0

9.9.10 Ebene (-8)

	Position	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
ETT	tats. Radius [mm]	30,3	30,3	30,3	29,3	29,3	29,3	29,3	29,3	29,3	29,3	29,3	30,3
15	abs. ETT [mm]	17,0	17,0	17,0	16,9	16,9	16,9	16,9	16,9	16,9	16,9	16,9	17,0
Radius	Auswertungsebene	(-8)	(-8)	(-8)	(-8)	(-8)	(-8)	(-8)	(-8)	(-8)	(-8)	(-8)	(-8)
26,5	Anströmwinkel [°]	-355	-355	-355	0	0	0	0	0	0	0	0	-355
	abs. Richtung [°]	110	140	170	195	225	255	285	315	345	15	45	80
	stat. Druck [hPa]	280,2	280,2	280,2	270,2	270,2	270,2	270,2	270,2	270,2	270,2	270,2	280,2
	Gesamtdruck [hPa]	335	337	339	340	332	324	321	330	333	332	330	336
	Geschwindigkeit [m/s]	85	87	88	96	91	85	82	89	91	91	89	86
	Temp. [°C]	23,0	23,0	23,0	23,0	23,0	23,0	23,0	23,0	23,0	23,0	23,0	23,0
ETT	tats. Radius [mm]	33,0	33,3	32,3	29,3	29,3	30,3	30,3	30,3	29,3	29,3	30,3	33,0
15	abs. ETT [mm]	17,4	17,4	17,3	16,9	16,9	17,0	17,0	17,0	16,9	16,9	17,0	17,4
Radius	Auswertungsebene	(-8)	(-8)	(-8)	(-8)	(-8)	(-8)	(-8)	(-8)	(-8)	(-8)	(-8)	(-8)
17	Anströmwinkel [°]	-355	-355	-355	0	0	0	0	0	0	0	0	-355
	abs. Richtung [°]	110	140	170	195	225	255	285	315	345	15	45	80
	stat. Druck [hPa]	307,0	310,3	300,3	270,2	270,2	280,2	280,2	280,2	270,2	270,2	280,2	307,0
	Gesamtdruck [hPa]	281	281	280	277	276	277	278	280	283	283	283	281
	Geschwindigkeit [m/s]	-	-	-	30	28	-	-	-	42	42	19	-
	Temp. [°C]	22,5	23,0	22,5	26,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,5	25,5	25,5	25,5

Persönliche Daten: Annika Hagendorf
Geburtsort: Moers
Geburtstag: 20.05.1976
Familienstand: ledig

Schulbildung:

1982 - 1986	GGS Kippekausen, Bergisch Gladbach
1986 - 1995	Dietrich-Bonhoeffer-Gymnasium, Bergisch Gladbach

Auslandsaufenthalt:

1992 - 1993	Lycée A. Artaud, Marseille, Frankreich

Ausbildung:

1995 - 1997	PTA-Lehranstalt, Köln

Studium:

April 1998 - April 2002	Pharmaziestudium, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität, Bonn
März 2000	1. Abschnitt der Pharmazeutischen Prüfung
April 2002	2. Abschnitt der Pharmazeutischen Prüfung
Juni 2003	3. Abschnitt der Pharmazeutischen Prüfung und Approbation als Apothekerin

Praktikum:

Okt. 1997 - März 1998	PTA-Praktikum, St. Johannis Apotheke, Bergisch Gladbach
Mai 2002 - Okt. 2002	Pharmaziepraktikum, Viktoria-Apotheke, Köln
Nov. 2002 - April 2003	Pharmaziepraktikum, Bayer AG, Leverkusen

Berufstätigkeit:

Juli 2003 - Juni 2006	Wissenschaftliche Mitarbeiterin, Lehrstuhl für Pharmazeutische Technologie, Bayerische Julius-Maximilians-Universität Würzburg

Thema der Dissertation:
“Untersuchungen zum Strömungsverhalten in einer Spiralstrahlmühle mittels Druckmessungen“

Betreuung: Herr Prof. Dr. I. Zimmermann